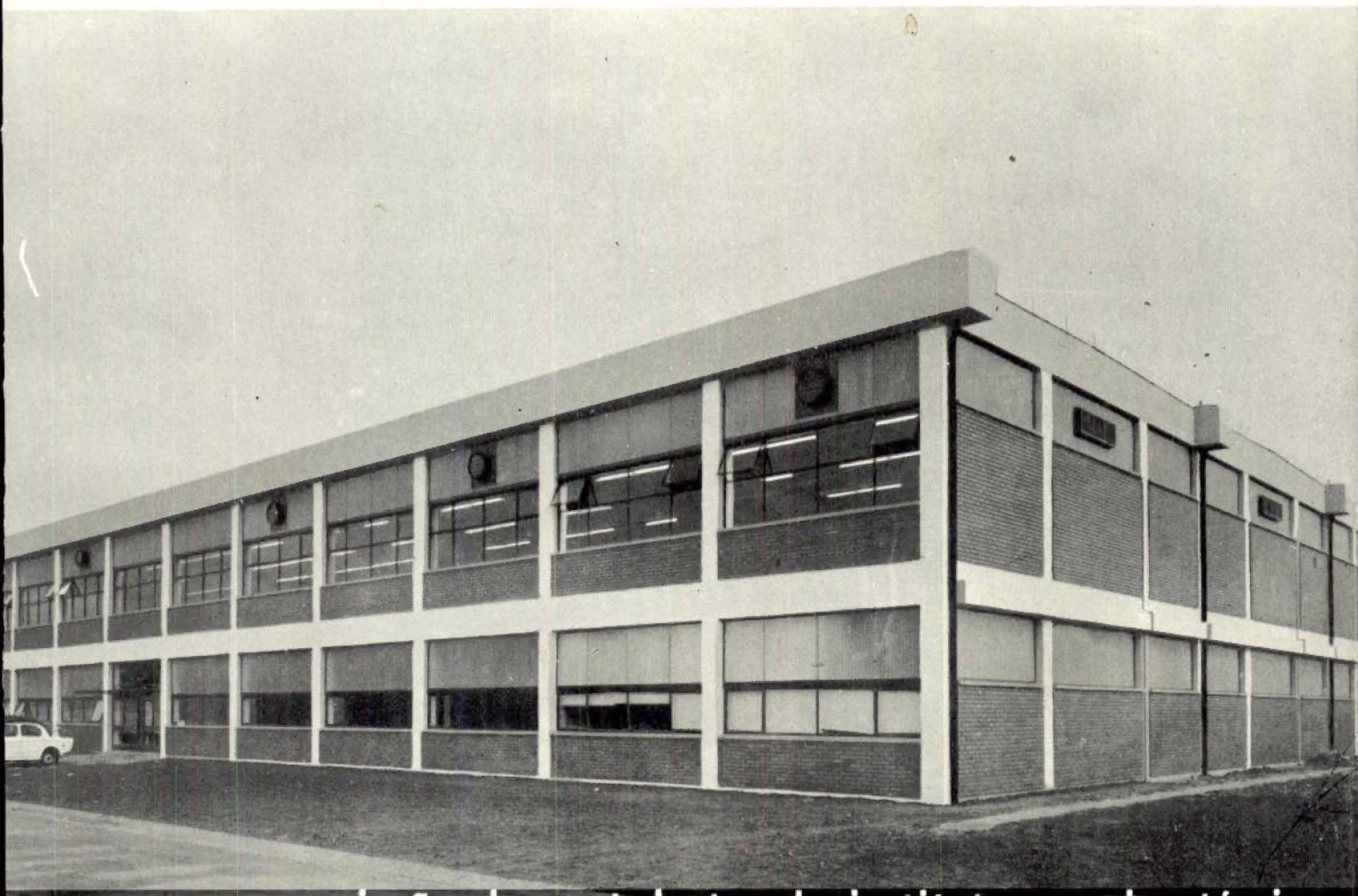
técnica



967 associação dos estudantes do instituto superior técnico
abril 1967 revista de engenharia

HELIAÇO

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40
(«Heliaço» e «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA
Ra = 2400 kg/cm²
e
Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente

HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

Fenner

REDUTORES DE VELOCIDADE
TIPO «PONTA DE VEIO»

mais de cem anos de progresso dos maiores fabricantes ingleses

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS:
AUTO-LUSITANIA
ALFREDO DUARTE L.da
AV. DA LIBERDADE 73-77 LISBOA

confiança para a construção com

materiais novobra

EM BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

pavimentos
coberturas
vigas de grande vão
asnas
perfis

SOCIEDADE DE PRÉ-FABRICAÇÃO E OBRAS GERAIS, NOVOBRA, LDA.
AV. EST. UNIDOS DA AMÉRICA, 100, 5.º D - TEL. 77 48 32/766446 - LISBOA-5

CIMENTO SECIL

SECIL

Fábrica:
Outão — Setúbal
Telef. 228824/5

Escritório:
R. do Comércio, 56-3.º
LISBOA 2
Telef. 328201/2/3

técnica

*NUMERO 367 * ABRIL DE 1967 * ANO XLII * VOLUME XXIX * PUBLICAÇÃO MENSAL*

Director
Assis Farinha Martins

Administrador
V. M. Martins Pinto

Secretário
Victor Coias e Silva

Redactores
Carlos A. C. Moreira
J. E. Pinto Ferreira
João M. G. Caraça

Editor e Proprietário
Associação dos Estudantes
do Instituto Superior Técnico

Redacção e Administração
Avenida Rovisco Pais
Telefone 77 54 49
Lisboa 1

★

Assinaturas

		5 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	—	70$00	130$00
Ultramar, Brasil e Espanha	—	80$00	140$00
Estrangeiro	—	90$00	150$00

Número avulso — 20$00

★

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Composto e impresso na Tipografia Jorge Fernandes, Lda. — Rua da Cruz dos Poiais, 103 — Lisboa

SUMÁRIO

321 *MERCIER MARQUES* — **O Engenheiro Químico e a Indústria**
The chemical engineer and the industry

331 *MANUEL GARRIDO* — **La théorie dynamique des machines électriques**
Dynamic theory of electric machines

355 *CORREIA DE ARAÚJO* — **A computação linear e o cálculo das estruturas**
Linear computation and calculation of structures

373 *VIRGÍLIO IGREJA* — **Estudo de um sistema de comando automático para o circuito de secagem e absorção de uma fábrica de ácido sulfúrico**
Automatic control of a drying and absorption circuit in a sulphuric acid plant.

*

383 **Vida Escolar e Associativa**
LUÍS VICENTE — Introdução aos sistemas digitais

330 **Notas Informativas**
Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional.

393 **Biblioteca**

CAPA: Um dos pavilhões já em funcionamento das novas instalações da Standard Eléctrica em S. Gabriel, Cascais.

Índice Alfabético dos nossos anunciantes

A

Pág.

Auto-Lusitânia . . . . . 2.ª da capa
AEG XIX
A. Johnson & Co (Portugal), Ltd. . . XXIX
Araldite XIV

C

CIDEX IV
Cimento Secil . . . . . 2.ª da capa
Cerâmica de Vale de Lobos, Ltd.ª . . XXV
Companhia de Cimentos Brancos . . VIII
Companhia Portuguesa de Fornos Eléctricos XXX
Construções Técnicas XXIII

D

DEVA XXVIII
Dial XX

E

Electro-Arco, Ltd.ª IV
Empresa de Cimentos de Leiria . . V e IX
Empresa Electro Cerâmica XXV
Empresa de Produtos Asfálticos . . . X
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Ltd.ª . . . . . 3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações XVI
Escondel XX

F

Faber-Castell XVIII
Fábricas Metalúrgicas ALBA XXIV
Fábrica Portugal II
Fanafel XVI
Fundações Franki, Lda. I

G

Guedes & Almeida, Lda. VI

H

Heliaço . . . . . 2.ª da capa
Hidrel XX

I

Pág.

Isola XIV
Isolux, Ld. XXIV
I. S. T. XXVI

J

J. Silva & Irmão XXV
Jayme da Costa, Lda XVII
Johann Keller XX

M

MAGUE XIII
Monteiro Gomes, Lda. III

N

Novobra, Lda. . . . . . 2.ª da capa

S

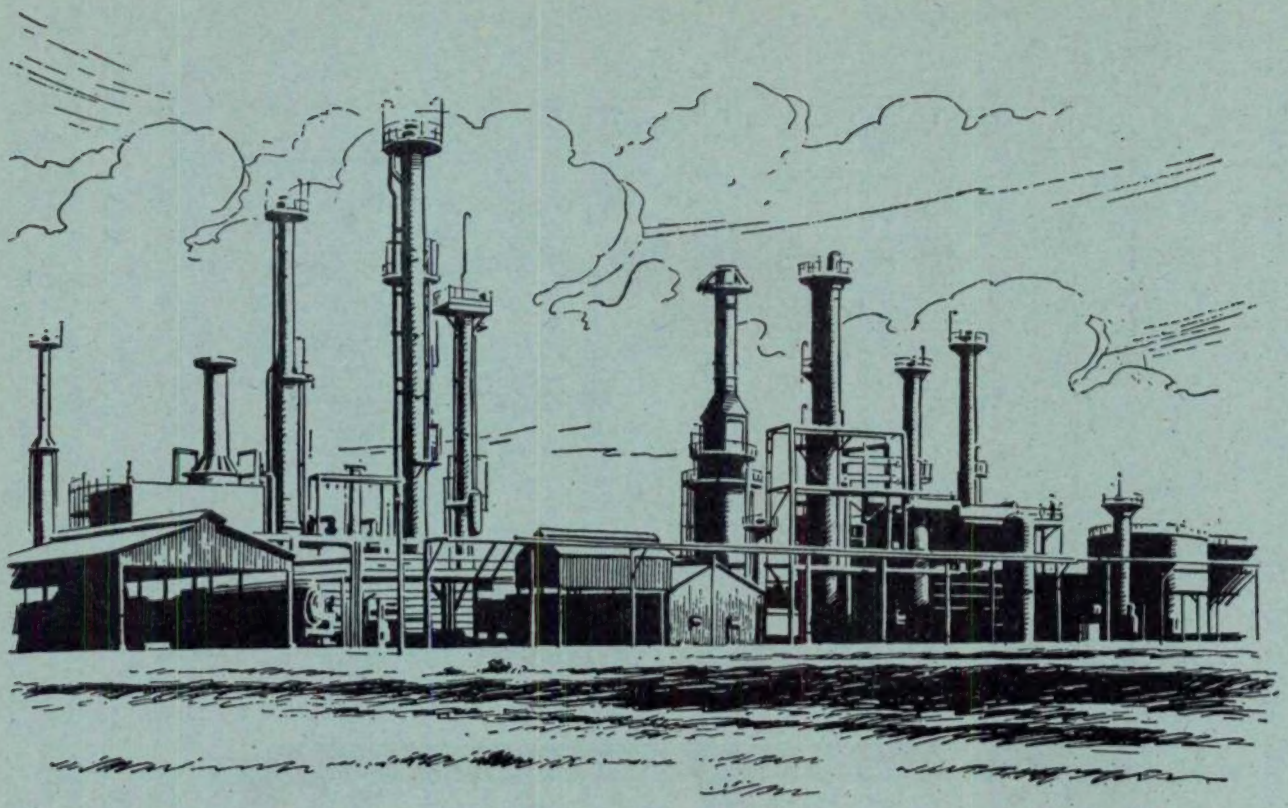
Soc. Const. Amadeu Gaudêncio . . XXVII
Sociedade de Electricidade Brown Boveri . . . . . 4.ª da capa
Sociedade Industrial Metalúrgica XXV
Soc. Michaelis de Vasconcelos . . . XII
Sociedade Portuguesa Cavan . . . VIII
Sondagens e Fundações A. Cavaco . IV
Sondagens Ródio, Ltd.ª XXVII
Sopecate V
Standard Eléctrica VII
STET XXI

T

TESSA III
Tudor XXVI

W

Wild Portugal, Lda. XV



Refinaria da Sonarep
(Matola — Moçambique)

Assente sobre

ESTACAS FRANKI

FUNDAÇÕES FRANKI L.DA

RUA BRAAMCAMP, 13-3.º — LISBOA 1 — TEL. P. P. C. 53 41 12/3/4 — ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI — LISBOA

PRÉDIO SANTOS GIL, 6.º ANDAR — SALA 10 — TEL. 9 11 67 — CAIXA POSTAL 1397

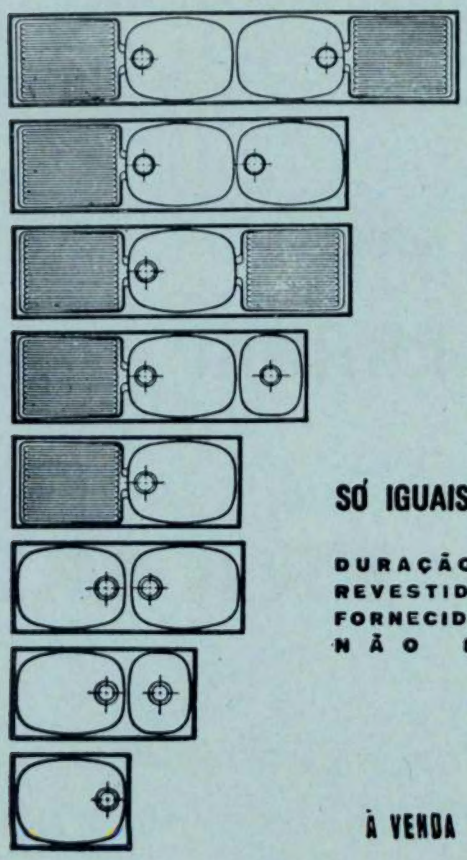
ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI—LOURENÇO MARQUES

USE NA SUA COZINHA UM ELEGANTE LAVA-LOUÇAS DE AÇO INOXIDÁVEL

CONCEBIDO PELA

FABRICA PORTUGAL

PARA MODERNIZAR OS LARES DE PORTUGAL



APRESENTADOS EM

8 MODELOS

"STANDARD"

EXECUTAM-SE FORA DE SÉRIE, MODELOS ESPECIAIS PARA GRANDES INSTALAÇÕES

SÓ IGUAIS AOS MELHORES ESTRANGEIROS

DURAÇÃO ILIMITADA • HIGIÉNICOS
REVESTIDOS DE ISOLAMENTO ESPECIAL
FORNECIDOS COM SIFÃO DE SEGURANÇA
NÃO PARTEM A LOUÇA

À VENDA NAS BOAS CASAS DA ESPECIALIDADE

Fitas adesivas para todas as aplicações

Estes rolos são apenas uma pequena fracção da nossa gama de fitas adesivas **tesa.**

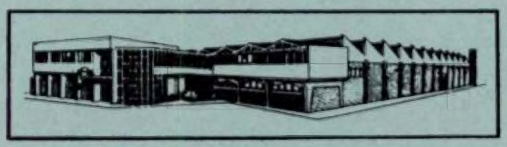
Temos muitas qualidades diferentes: incolor e a cores, em celofane e PVC, papel e tecido, com ou sem impressão, com massa colante de um ou dos dois lados (a gama de fitas adesivas **tesa** é a mais completa fabricada em Portugal, e em toda a Europa).

No entanto, todas as fitas **tesa** têm uma característica em comum: cada uma foi cuidadosamente estudada e concebida segundo a sua aplicação.

Seja qual for a sua actividade profissional, temos uma fita adesiva própria para racionalizar o seu trabalho.

tesa

tesaband — tesaborde — tesafilm
tesafix — tesaflex — tesafort
tesakrepp — tesamoll — tesaprint — tesatip,
são marcas registadas correspondentes
a produtos originais «tesa»
de alta qualidade.



BEIERSDORF PORTUGUESA S.A.L.R. / Queluz **Secção de Vendas: Lisboa – Praça da Alegria, 58-1.º Tel. 32 69 43, 32 29 57**

Bombas centrífugas «PACIFIC»

Construídas por

Batignolles - Chatillon

Especialmente destinadas para:

— Petróleos
— Indústrias químicas
— Construções navais
— Centrais eléctricas
— Alimentação de caldeiras
— Etc., etc.

Sob as condições de funcionamento seguintes:

— Débitos: 1 m³/h a 10.000 m³/h
— Pressões: altas e baixas
— Temperaturas: −180° C + 500° C
— Líquidos: corrosivos ou não

Para estudos e orçamentos, consultar o representante em Portugal:

CIDEX — Comércio Internacional
e Representações Industriais, Lda.

Av. Casal Ribeiro, 46-2.º/Telef. 73 53 07/LISBOA 1

• ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA

• SONDAGENS

• REBAIXAMENTO DE NÍVEIS AQUÍFEROS

• FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA, 62, R/C ESQ. — LISBOA-1
- TELEF. 56 11 71/72/73

ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS ✦ POSTOS ✦ ACESSÓRIOS
PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

*

ESCOLAS DE SOLDADURA

—

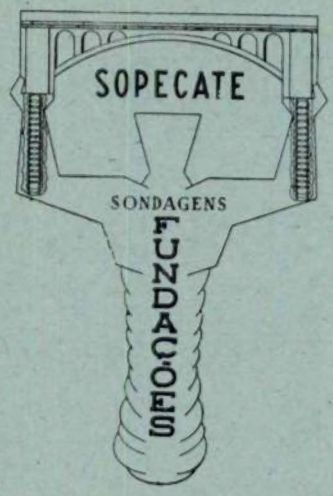
MATERIAL APROVADO PELOS
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

—

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33

PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73



SOPECATE

SONDAGENS
FUNDAÇÕES

Escritório — R. DO ARSENAL, 146, 2.º Esq., Dt.º e Fr.te
Estaleiro e Oficina — RUA PEREIRA HENRIQUES, 58

TELEFONES
SERVIÇOS ADMINISTRATIVOS 34010
SERVIÇOS TÉCNICOS 320208
ESTALEIRO E OFICINAS 381238

LISBOA

SENHORES

ARQUITECTOS, ENGENHEIROS, EMPREITEIROS, CONSTRUTORES
DANDO PREFERÊNCIA, NAS VOSSAS OBRAS, AO

BETÃO PRONTO
LIZ

EVITAM: PERDAS DE TEMPO E STOCKS DE MATERIAIS
ECONOMISAM: MÃO-DE-OBRA, E DINHEIRO

UM PRODUTO DAS CENTRAIS DE BETÃO
DA

EMPREZA DE CIMENTOS DE LEIRIA

1.ª CENTRAL — AV. INFANTE D. HENRIQUE, LOTE 572
2.ª CENTRAL — RUA B — QUINTA DO PAIZINHO — (CARNAXIDE)
TELEFS: 389796-380031-380032

WABCO

WESTIN'GHOUSE
AIR BRAKE COMPANY
Construction Equipment Division
Peorta (Ilinois) - 61601

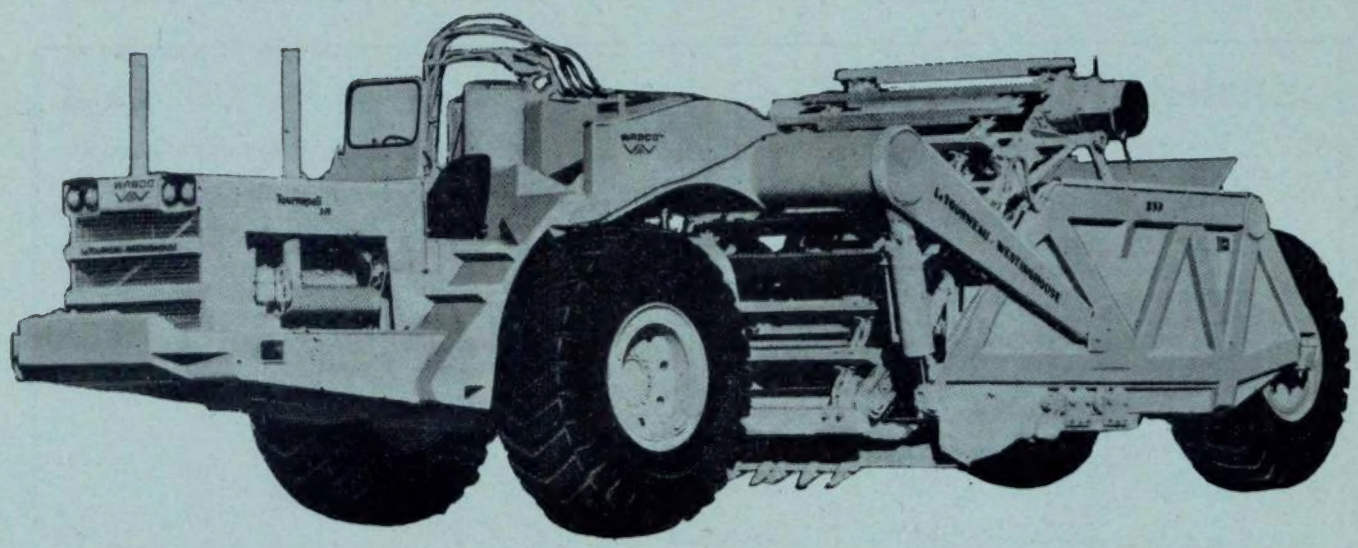
"TOURNAPULL-SCRAPERS"

LE TOURNEAU WESTINGHOUSE

CAPACIDADE DE 11, 21 E 31 JARDAS CÚBICAS

NÃO NECESSITA DE TRACTOR PARA EMPURRE!
UMA SÓ MÁQUINA... UM SÓ OPERADOR...

Escarifica... Carrega... Transporta... Descarrega... Em terrenos de toda a natureza!

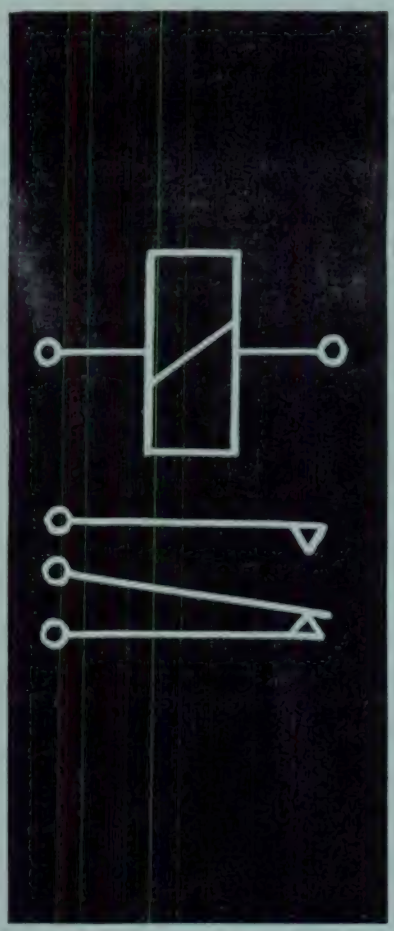


DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

GUEDES & ALMEIDA LDA.

Rua Áurea, 181 - 2.º — LISBOA-2 — TELEFS. 32 50 80 e 32 78 45

Através das suas organizações de: LISBOA • LUANDA LOBITO • NOVA LISBOA e Agências de: PORTO, GUINÉ, S. TOMÉ E PRÍNCIPE e CABO VERDE fornecerá todos os elementos técnicos, para criteriosa escolha, assistência técnica e sobresselentes.
A1-a



Nesta publicação poderá encontrar o relé que procura!

Este novo Catálogo de Relés é apenas uma introdução às diferentes gamas de relés da ITT, embora referindo 114 tipos diferentes. Cada tipo é ilustrado por uma gravura, sendo também indicadas as dimensões gerais, as características eléctricas básicas e as possíveis combinações dos contactos.

A ITT fabrica as mais vastas gamas de relés e contactos do mundo - desde as unidades simples e de baixo custo até aos complexos relés de contagem. Modelos para aplicações médias, miniatura e de trabalho pesado são igualmente abrangidos.

Entre os tipos descritos nesta nova publicação encontram-se relés pequenos, médios e reforçados para utilização geral, tipos militares, relés polarizados, modelos para contagem e selecção, jogos de contactos secos em ampola de vidro e respectivos relés e jogos de contactos molhados por mercúrio e respectivos relés. Consultando este novo catálogo é possível escolher os tipos em que está interessado e pedir então os respectivos folhetos de características com especificaçoes técnicas completas.

Escreva ou telefone pedindo a publicação 6800-02 a:

STANDARD ELÉCTRICA, S.A.R.L.
Divisão de Componentes
Avenida da India
Lisboa — 3
Telefone: 638171 – Telex: 1572 Microf P

Componentes electrónicos ITT Standard

67/14-P

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS
COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

SOCIEDADE PORTUGUESA **Carvam**

RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A-LISBOA-1 -TELEF. 47812-50129

Companhia de Carvões e Cimentos do Cabo Mondego

CAL HIDRÁULICA CABO MONDEGO

Fábrica totalmente remodelada

As mais modernas instalações de:

Cozedura	Com ar insuflado
Hidratação	Patente portuguesa projectada e construída em Portugal
Moagem	Automática
Expedição	Máxima rapidez na ensacagem e carregamento

A maior fábrica do País

A melhor Cal

A mais barata

Expedição contínua — Dia e noite

Celulite

ISOLAMENTO
TÉRMICO DAS
CONSTRUÇÕES

PAVIMENTOS
*
TECTOS
*
PAREDES
*
CÂMARAS
FRIGORÍFICAS
*
ISOLAMENTOS
INDUSTRIAIS

Terraços e pavimentos isolados com CELULITE no edifício da Comp.ª de Seguros Fidelidade — P. das Águas Livres — Lisboa

SETH, LDA. • RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.° • TEL. 53 01 56 — LISBOA

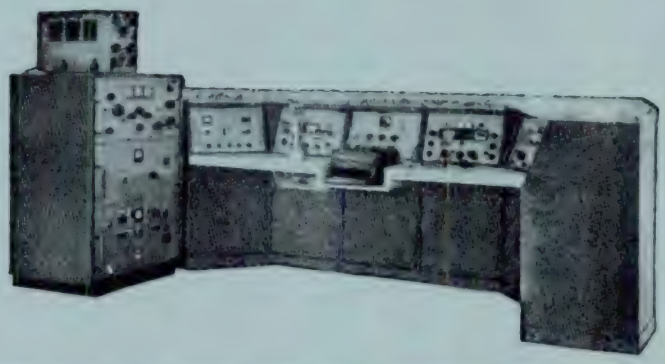
Para impermeabilizar terraços,
paredes, fundações, etc.

COLAGEM DE
TACOS DE MADEIRA

TELEF. 53 0156 TELEG. EPALDA — LISBOA

EMPREZA DE PRODUCTOS ASFÁLTICOS
IMPERMEABILISADOR
IMEPA
RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.° - LISBOA

FÁBRICA EM SACAVÉM



Comunicações

equipamentos
e sistemas completos

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION

HEWLETT hp PACKARD

aparelhagem electrónica de medida e registo

Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador Sanborn

Registador digital Dymec

Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

TELECTRA EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.

Novo disjuntor «Oerlikon»
de pequeno volume de óleo
Campo de tensões: 60 a 500 kV
Corrente de corte: 40 e 60 kA

Tipo **F**

Duração curta do arco independente da corrente cortada

Corte sem reescorvamento

Insensível aos defeitos quilométrico e evolutivo

Corte múltiplo

Contacto móvel accionado hidràulicamente, sem varetas ou molas

Funcionamento silencioso, reacção dinâmica insignificante

Montagem simples, sem regulações

Ateliers de Construction Oerlikon

Zurich **Suíça**

Representantes para Portugal e Ultramar:
Sociedade
Mich. de Vasconcellos, Lda.
Porto e Lisboa.

técnica

NUMERO 367 * ABRIL DE 1967 * ANO XLII * VOL. XXIX * DIRECTOR: ASSIS FARINHA MARTINS

C. D. U. 66.007.1

O ENGENHEIRO QUÍMICO E A INDÚSTRIA (*)

pelo ENG.º JOSÉ MERCIER MARQUES
Bastonário da Ordem dos Engenheiros

RESUMO

O presente trabalho divide-se em três partes: O Engenheiro Quimico, a Indústria e o Engenheiro Quimico na Indústria.

Na primeira historia-se a evolução da profissão no nosso pais dedicando particular atenção aos problemas da formação e às diferenças existentes entre a preparação antiga e a actual dum engenheiro quimico. Refere-se seguidamente ao papel do engenheiro quimico, a sua missão perante a indústria e à necessidade de preparação pós-universitária a qual leva imediatamente a não haver um divórcio entre a vida profissional do engenheiro e a Escola onde se formou.

Seguidamente focam-se diversos aspectos da indústria quimica nacional, os seus muitos e variados problemas, a gestão cientifica das empresas, o desenvolvimento industrial do pais, considerando quais as perspectivas desse desenvolvimento e o papel que nele terão os engenheiros quimicos.

Finalmente, na terceira parte do trabalho aborda-se a posição do engenheiro quimico na indústria e perante a Nação, mostrando através da sua experiência como deve o engenheiro actuar não só em relação aos seus superiores hierárquicos como também em relação aos seus subordinados e colaboradores de todos os niveis.

SYNOPSIS

This paper can be divided into three parts: the Chemical Engineer, the Industry *and* the Chemical Engineer in the Industry.

In the first part the evolution of this profession in Portugal is resumed, with particular reference to the problems of formation, and to the differences existing between the former and the present preparation of a Chemical Engineer.

The role of the chemical engineer, his mission in the industry are then referred and the need of a post-graduate preparation avoiding a divorce between the professional life and school, is pointed out.

Several aspects of the Portuguese chemical industry are focused — scientific direction of the country, considering the perspectives of that development and the role chemical engineers play in it.

Finally, in the third part, the position of the chemical engineer in the industry and in the nation is taken into consideration, showing how the engineer must behave not only in relation to his principals but also in relation to his subordinates of all levels.

I — O ENGENHEIRO QUÍMICO

Remontando o curso da minha vida até esses dias longínquos da primeira guerra mundial, em que iniciei os meus estudos de engenharia química, recordo que esta especialidade era então, entre nós, quase inexistente. Poderei acrescentar, também, que não existindo ainda pràticamente indústria química, os engenheiros da especialidade não eram, de facto, necessários. Assim se explica

(*) Conferência proferida na Sessão Inaugural da II Semana de Engenharia Químico-Industrial.

que, nessa altura, o I. S. T. formasse apenas em cada ano, um ou dois engenheiros químicos que, mesmo assim, encontravam dificuldades para se colocar.

Na realidade, a maior parte da gente ignorava o que era e para que servia a nova profissão e mesmo pessoas muito qualificadas confundiam o engenheiro químico com o analista.

As poucas indústrias químicas que se contavam no País, estavam em geral entregues a práticos ou, excepcionalmente, a um ou outro engenheiro estrangeiro.

Pode dizer-se que, embora desde a sua fundação e graças à inteligente orientação do seu ilustre fundador Alfredo Bensaúde, o I.S.T. incluisse na sua lista de cursos o de engenharia química, ao qual tão relevantes serviços prestou esse estimado e saudoso Professor que foi Charles Lepierre, só uns bons quinze anos após a fundação do Instituto Superior Técnico, o engenheiro químico começou a entrar na Indústria. E, sem sombra de exagero e apenas porque é justo dizê-lo, deve-se esse facto à superior visão industrial desse homem fora de série que foi Alfredo da Silva que, através de inúmeras dificuldades venceu, com a sua tenacidade indomável, a rotina, introduzindo um espírito novo nas indústrias químicas que administrava.

Com o desenvolvimento do grande complexo industrial do Barreiro, a procura de engenheiros químicos aumentou e tendo o exemplo frutificado, abriram-se à nova profissão horizontes até então insuspeitados.

É interessante anotar-se que até há relativamente pouco tempo, mesmo para os outros especialistas da engenharia, os químicos eram considerados uma espécie de parentes pobres. Foi necessário verificar-se esse prodigioso progresso da indústria química, ao qual se deve em parte muito substancial o progresso do mundo, para que o engenheiro químico conquistasse o prestígio que, em toda a parte, hoje se lhe reconhece.

Evidentemente, tornou-se indispensável uma profunda modificação dos métodos de ensino, adaptando-os a uma óptica nova da formação do moderno engenheiro químico, para que este passasse a corresponder às responsabilidades que actualmente se lhe exigem. De aí a impressionante diferença que existe entre a preparação científica e tecnológica ministrada a um engenheiro químico há cinquenta anos e aquela que ele hoje recebe. É que as suas funções são também profundamente diferentes.

A este propósito não resisto à tentação de reproduzir uma passagem do texto elaborado por Pierre Piganiol, antigo ministro francês da Investigação científica e técnica, sobre o: «*O engenheiro, agente do progresso científico e técnico. Seu lugar em relação aos cientistas puros na investigação e desenvolvimento*», para ser discutido no 5.º Congresso Internacional dos Engenheiros, promovido pela FEANI, a realizar no próximo mês de Maio em Atenas, subordinado ao tema geral «*O engenheiro e o progresso económico e social*».

Numa admirável síntese, em que se evidencia um belo espírito cartesiano, Pierre Piganiol estabelece paralelo entre a antiga e a moderna engenharia química, nos seguintes termos:

«O mais belo exemplo das concepções do engenheiro é-nos fornecido pelo estudo da engenharia química (génie chimique).

O papel do engenheiro químico é o de conceber e construir as unidades fabris de produção. No passado a bagagem do engenheiro consistia essencialmente no conhecimento de um certo número de aparelhos correspondentes às operações unitárias, tais como a filtração, trituração, mistura, destilação. Ele dispunha, igualmente, dum conjunto de processos unitários correspondendo aos principais tipos de reacção química: condensação, hidrólise, etc.

O primeiro grupo destes conhecimentos era ensinado no espírito tecnológico antigo à maneira de uma lição de coisas muito empírica. O segundo grupo de conhecimentos retomava, sob uma forma esquemática, os elementos do curso científico da química. Ora, sob a pressão das necessidades das fábricas, os engenheiros foram levados a introduzir uma nova ordem nos seus conhecimentos. Eles reconheceram que os fenómenos fundamentais são deslocações de massa, de calor, de energia. Foram levados a retomar o conjunto das operações de engenharia química, classificando e caracterizando por equações os diversos tipos dessas transferências, não se interessando pela reacção química em si mesma, senão na medida em que ela é uma cinética das transformações da matéria e um

fluxo de libertação de calor. A engenharia química tomou então a sua forma nova e os métodos de extrapolação derivados da nova estrutura da doutrina química revelaram-se tão eficazes que na indústria do petróleo, por exemplo, pode-se projectar uma instalação de produção das capacidades 1000 a 10 000, a partir de ensaios de laboratório especialmente conduzidos sobre uma capacidade unidade.

Assim, o engenheiro utilizou os métodos científicos mais modernos para estabelecer ordem em fenómenos muito complexos, o que impôs o conhecimento pormenorizado de fenómenos tais como a adsorção e a difusão.»

Neste texto do já referido ilustre cientista, professor e homem público francês, se define com indiscutível precisão e clareza o que deve entender-se, hoje, pela designação de engenheiro químico. Ele é o homem que concebe, constrói e dirige a produção de unidades industriais, com conhecimentos sòlidamente assentes numa profunda cultura científica e tecnológica.

Não é, porém, apenas esta a missão do engenheiro perante a indústria; ela é muito mais complexa, como adiante se verá. O espectro das suas actividades é extremamente vasto e a gama das indústrias a que pode ligar o seu destino de profissional, pràticamente ilimitada. Nenhuma especialidade da engenharia possui a diversidade de aplicações que esta apresenta. Dispenso-me, por absolutamente deslocado e ocioso numa assembleia como esta, de tentar sequer esboçar uma lista mesmo sumária das indústrias que podem requerer os serviços do engenheiro químico. Seria tarefa alucinante, evidentemente desnecessária e que exigiria muito mais tempo que aquele que pode ser atribuído para abusar da paciência de V. Ex.as.

O engenheiro químico deverá estar preparado bàsicamente para abordar o estudo de qualquer indústria química, planeá-la, construí-la e, eventualmente, dirigi-la. Compreende-se, dada a vastidão da matéria, que exista uma tendência marcada para uma especialização cada vez maior. As indústrias petroleiras, a siderurgia, a cerâmica, o vidro, os adubos, etc., sem deixarem de pertencer à grande família da indústria química, já conquistaram uma autonomia, uma emancipação, que a diversidade dos seus problemas específicos e os progressos técnicos impõem. O engenheiro terá, assim, de ir buscar à preparação pós-universitária a soma de conhecimentos especiais de que a sua formação careça.

Esta circunstância exige que através da sua vida profissional o engenheiro nunca se divorcie da Escola. O problema da formação permanente do engenheiro é uma preocupação grave, dados os riscos de desactualização, a que a constante evolução das ciências e das técnicas o sujeitam.

Na última conferência da EUSEC, em Copenhaga, realizada em Setembro do ano passado, foi o assunto largamente ventilado. Na ordem dos Engenheiros foi recentemente objecto de uma conferência do Prof. Eng.º Ario de Azevedo que mostrou à evidência a grande importância do problema.

A EUSEC é, como se sabe, um organismo internacional de engenheiros dedicado especialmente às questões de formação e está intimamente ligada à FEANI, areópago internacional que engloba 600 000 engenheiros de toda a Europa Ocidental e que, num futuro que não virá longe, se fundirá com os de outras zonas para formar um novo Organismo em que virão a estar representados, porventura, todos os agregados de engenheiros do mundo inteiro.

É bem sabido que o progresso de um país depende principalmente da qualidade do seu material humano, isto é, da formação que este tiver recebido na Escola. Esta formação deverá abranger todos os escalões sociais, visando não só a constituição de um escol destinado às múltiplas tarefas directivas, mas também à dos quadros executivos para todos os sectores da actividade nacional. Daquele escol sairão os Governantes, os Professores, os altos funcionários Administrativos, os Chefes de Empresas, os Dirigentes de Indústrias, etc. O pessoal executivo formará os quadros que deverão completar harmoniosa e eficientemente todo o edifício social. Quaisquer defeitos nas malhas deste contexto traduzem-se sempre no mau funcionamento do conjunto e em prejuízos de vária ordem que emperram o progresso do país.

É evidente, portanto, que a qualidade dos quadros, seja qual for o nível a que se encarem, dependerá fundamentalmente da preparação escolar que for ministrada aos seus componentes.

E, seria lugar comum afirmar que não é só a duração de um curso o factor mais importante do ponto de vista de uma boa formação, porquanto outros, tais como a sua organização, constitui-

ção dos programas, proporção entre as aulas teóricas e as práticas, o material didático de que se dispõe, o ambiente escolar, etc., têm uma influência decisiva na consecução de um bom material humano.

No caso particular do engenheiro e dos seus colaboradores técnicos, a formação terá uma importância capital, visto que ele tem de ser, pela missão que lhe incumbe, um chefe, um verdadeiro condutor de homens e que da boa ou má orientação que saiba imprimir à sua acção, dependerá, em última análise, a produtividade das indústrias e, portanto, o nível dos salários, a qualidade dos produtos, as possibilidades de exportação, a própria tranquilidade social, numa palavra, a expansão económica do país.

Assim, a formação tem que preparar homens competentes, munidos de uma sólida cultura profissional e geral, capazes de arcar com as enormes responsabilidades que impendem sobre os técnicos, num mundo eminentemente técnico, assoberbado por miríades de problemas de toda a natureza. A formação permanente do engenheiro, visando evitar a desactualização dos seus conhecimentos, num meio em constante evolução, assume uma importância que não é menor que a da formação original.

Portugal não pode alhear-se da marcha de um assunto que tem já raízes universais e que acabará por unificar pontos de vista, ainda hoje discordantes, mas que as realidades exigirão que se coordenem e se harmonizem.

De tudo o que acabo de dizer, pode concluir-se que dada a posição do engenheiro no mundo actual, dadas as responsabilidades que se lhe exigem, como colaborador dos mais valiosos do progresso económico e social, tanto a sua formação original como a sua formação permanente revestem aspectos da maior transcendência.

Não é, porém, menos transcendente a missão que lhe está reservada como chefe, o que pressupõe uma perfeita formação moral e uma boa cultura humanista.

E, para se ter uma ideia aproximada da evolução das exigências da indústria portuguesa em engenheiros químicos nos últimos trinta anos, basta dizer-se que em 1936, quando foi criada a Ordem dos Engenheiros, não atingia 100 inscritos o número de químicos, ao passo que hoje figuram nos seus registos quase 600, isto é, cerca de 10 % da totalidade dos seus Membros. Embora o número seja ainda baixo para as reais necessidades da Indústria é já bastante significativo e tende a aumentar.

Passemos, agora, à 2.ª parte desta simples exposição.

II — A INDÚSTRIA

Lê-se nas enciclopédias, mesmo nas mais recentemente editadas, que a Indústria é «um conjunto de actividades e de ofícios, que produz riqueza pela transformação de matérias-primas».

Na realidade, esta definição demasiado simplista está longe de nos deixar entrever a complexidade da indústria moderna.

Ao antigo empirismo que presidia à instalação de uma pequena unidade industrial, ainda muito próxima do artesanato, substitui-se um espírito científico que não pode deixar lugar a amadorismos perigosos ou às contingências do acaso. Ao antigo industrial que se contentava para erguer a sua fábrica, com o dispôr de mão-de-obra, matérias-primas, água, energia e esgotos, sucedeu um industrial muito mais exigente e prudente que manda proceder a um estudo económico da indústria projectada, se preocupa com os condicionalismos legais, com as implicações internacionais, com a poluição das águas e do ar, com as flutuações do preço das matérias-primas, combustíveis, energia, etc., etc.

Se remontarmos à origem desta nova orientação, verificamos que foi o engenheiro o principal responsável por tal viragem, ao introduzir nos processos da produção o espírito que provém da sua formação científica. Teria sido impossível atingir-se o desenvolvimento industrial dos nossos dias, se as fábricas continuassem sob o comando exclusivo dos práticos, cuja experiência embora muito

útil, não seria, de forma alguma, suficiente para o cálculo das grandes unidades impostas pelas leis económicas.

Assim, não se pôde evitar o drama resultante de muitas pequenas fábricas regidas por mestres terem tido de se concentrar em unidades maiores, mais económicas, comandadas por engenheiros, passando aqueles a segundo plano ou simplesmente afastados e reformados, com todas as consequências sentimentais que tais revoluções acarretam.

O preço do progresso.

De resto, a evolução da ciência e das técnicas estabeleceu, em muitos casos, a dimensão económica das unidades fabris, marcando-lhe limites precisos e definindo desde logo, em face da complexidade dos serviços, qual deverá ser o seu quadro técnico.

E não me refiro aqui, apenas ao quadro de engenheiros, de agentes técnicos e de pessoal fabril especializado; quero designar igualmente funcionários administrativos, de relações humanas, economistas, contabilistas, etc.

Numa grande unidade industrial todo o conjunto humano tem de funcionar harmònicamente, não devendo de qualquer forma existir atritos entre os técnicos da produção e os dos serviços comerciais, cuja acção tem de ser considerada complementar e nunca antagónica. Refiro-me a este ponto apenas porque, em geral, os engenheiros são alérgicos à papelada que os serviços administrativos e comerciais lhes debitam em profusão, para poderem cumprir as suas funções.

É um mal necessário que tem de se aceitar com filosófico optimismo. E, se essa papelada constituída por mapas, guias, facturas, etc., corresponder a um serviço bem organizado, ela ajudará grandemente a determinar, em qualquer momento, se a indústria caminha normalmente ou a fazer o diagnóstico daquilo que esteja errado a fim de se lhe dar remédio rápido.

E, não convém nunca que o engenheiro se alheie de tais questões pois está sempre sujeito a ascender a um cargo administrativo em que, será o primeiro a ter de exigir essa utilíssima contribuição para uma acção eficiente.

Os problemas da indústria são muitos e variadíssimos, aumentando em progressão geométrica quando ela atinge certa dimensão. A gestão científica das grandes empresas fabris exige o estudo aprofundado da sua produtividade, das relações humanas e seus problemas disciplinares, do combate ao desperdício, da fiscalidade, de patentes e invenções, da legislação industrial, da aquisição de matérias-primas, de investigação, de controle de qualidade, de concorrência, etc., etc.

Compreende-se, portanto, a necessidade de quadros bem formados, cônscios das suas responsabilidades, que possam eficazmente contribuir para o progresso da Empresa.

É que a indústria desempenha um papel primacial na economia das nações, com suas implicações sociais profundas. É a ela que se vão buscar os salários mais altos, mola principal do desenvolvimento, visto que sem bons salários não há compradores, nem paz social.

À medida que o progresso aumenta, o homem torna-se mais exigente de bem estar, sente com maior acuidade a necessidade de bens de consumo, fazendo incrementar a produção, criando prosperidade geral.

E, apesar de Portugal não possuir tradição industrial, tem de se aceitar como verdade incontroversa que o seu desenvolvimento no campo da Indústria é uma magnífica realidade nestes últimos anos, bem demonstrada no facto de, no ano transacto mais de 50 % do produto bruto nacional terem provindo da Indústria.

Surgiram ùltimamente entre nós unidades Industriais de tal envergadura que há poucas dezenas de anos seriam consideradas sonho ou utopia, tão longe estavam da escala normal das realizações portuguesas. As grandes fábricas de adubos, as de produção dos azotados sintéticos, as novas instalações de síntese de ácidos sulfúrico, clorídrico e azótico, as enormes fábricas de celulose e de papel, as destilarias de petróleo, as unidades cimenteiras, as instalações para a produção de plásticos e de fibras sintéticas, as importantes unidades amideiras e de indústria bioquímica de levedura e antibióticos, etc., são belas manifestações de claro desenvolvimento.

Os engenheiros químicos podem orgulhar-se por terem dado um importante contributo para o progresso industrial e económico do país.

E, parece-me interessante registar um facto que constitui um bom sistema de uma mentalidade industrial que começa a afirmar-se entre nós: a circunstância de já se tornar corrente reinvestir os lucros das indústrias nas próprias indústrias, seja para ampliação e modernização de instalações, seja para criação de indústrias subsidiárias ou complementares da principal.

Este autofinanciamento tem as mais benéficas incidências no desenvolvimento das indústrias, porquanto as alivia de encargos parasitários e demonstra claramente que uma indústria é como um corpo vivo cujo crescimento não pode parar, sob risco de morte. Tem de se considerar que uma indústria nunca está acabada de instalar, pois tem de acompanhar a evolução dos processos de fabricação, trocar o equipamento obsoleto por outro que permita melhor produtividade, substituir por máquinas sempre que possível a mão-de-obra sobretudo num momento em que ela escasseia e encarece.

Uma fábrica cuja instalação se dá por definitivamente terminada está na realidade moribunda ou para lá caminha.

Por outro lado, as perspectivas da indústria química portuguesa são bastante animadoras a avaliar pela taxa média de crescimento das importações no período de 1960 a 1964, tal como é apresentado no Relatório de Síntese da Comissão Relatora do III Plano de Fomento. Aí se vê que essa taxa atinge 10 % para as indústrias químicas e 6 % para a dos derivados do petróleo e do carvão, o que demonstra nìtidamente a carência de produtos de origem nacional.

A título informativo e por serem as mais significativas, extraio do mesmo Relatório as seguintes cifras: 17 % para os produtos químicos inorgânicos, 18 % para os orgânicos, 13 % para os pigmentos e corantes, 7 % para as resinas e borracha sintéticas, 7 % para os óleos e gorduras animais, 14 % para as tintas e vernizes, 18 % para os derivados de cera e parafina, 14 % para os óleos essenciais, 7 % para as perfumarias, 11 % para produtos químicos diversos. Houve uma diminuição de 18 % nas importações dos amidos e féculas, e de 5 % nas de grudes, colas e gelatinas.

Verificaram-se taxas de acrescimento das importações de 5 % para os produtos da refinação do petróleo e de 13 % nas de asfaltos, coque de petróleo e emulsões asfálticas.

Como se vê, há ainda muito a fazer para se reduzirem as importações de produtos da indústria química, isto é, para melhorar o saldo da nossa balança comercial.

E, não me cansarei nunca de o repetir, em especial aos jovens engenheiros, que para melhorarmos a nossa situação económica, o remédio mais eficaz, o mais positivo, é sem dúvida o de reduzir implacàvelmente o volume das nossas importações, substituindo-as cada vez mais por produtos de fabricação nacional. Isto sem embargo do incremento das exportações. Só assim poderemos tender para a supressão de um deficit endémico da nossa balança comercial que excede largamente os dez milhões de contos, que representam uma sangria grave na riqueza nacional.

É à indústria e aos engenheiros que compete dar remédio a tal situação.

A indústria será, portanto e cada vez mais, o verdadeiro esteio da economia portuguesa, devendo caracterizar-se por uma organização impecável bem assente em quadros válidos.

O autêntico industrial é aquele que entende claramente a alta missão social que tem de desempenhar e que, em larga medida, exigirá dele um sem número de sacrifícios. Ser industrial a sério é exercer um verdadeiro apostolado.

Após estas breves notas sobre indústria, permitir-me-ei passar ao terceiro capítulo da minha modesta exposição.

III — O ENGENHEIRO QUÍMICO NA INDÚSTRIA

À parte certas excepções pouco numerosas, o jovem engenheiro recém-formado prefere aplicar a sua actividade profissional na indústria.

Dotado de uma bagagem científica e técnica muito vasta, cônscio das possibilidades da carreira que escolheu, ele sente-se atraído pela Indústria, onde prevê poder ocupar uma posição de chefe, actuar dinâmicamente, conquistar uma independência material, legítima ambição humana, continuar a aumentar os seus conhecimentos por uma experiência e estudos que lhe assegurem um lugar digno na sociedade e lhe garantam o futuro.

Admito como premissa que ele escolheu a profissão por vocação e não forçada ou indiferentemente pois, como disse Orisson Marden no seu estilo pitoresco, «não se deve forçar rapazes quadrados a passar por buracos redondos». Todas as profissões devem ser exercidas com agrado, com amor. Aquele que erra na escolha da profissão será sempre um frustrado, um revoltado, um vencido. Deverá, a tempo, fazer a agulha para outra via.

Para o engenheiro químico, a Indústria é, sem dúvida, a via mais indicada; não deve, porém, esquecer-se que ela é coisa exigente e complexa e que não se instala com intuitos filantrópicos. A Indústria cria-se para dar lucros e é, em grande parte, da acção do engenheiro que dependem esses lucros. Por isso a sua vida não é nenhuma sinecura; pelo contrário: é árdua, absorvente e as mais das vezes não lhe permite, sequer, ter um horário rígido.

A sua vida profissional deve ser abordada com modéstia, com a convicção que para lá da Escola há ainda muito que aprender e que só o contacto com a experiência alheia pode completar a sua formação. Essa aprendizagem não se fará apenas com os dos escalões superiores da hierarquia industrial, mas também com os colaboradores mais modestos.

Por isso, repito, quando o jovem engenheiro inicia o exercício da profissão, deve fazê-lo sem vaidade, sem o alarde escusado de uma omniscência que o porá, desde logo, à mercê de todas as «cascas de laranja» que não deixarão de lhe lançar sob os pés, não só aqueles a quem não inspire simpatia, mas também outros que pretendam simplesmente «gosá-lo», especulando sobre a sua boa fé e inexperiência.

A sua condição de chefe, de condutor de homens, exige dele um somatório de qualidades, raras vezes reunidas num só indivíduo: prudência, ponderação, espírito de justiça, educação, sociabilidade, decisão, tolerância, humanidade numa palavra. Isto sem falar numa inteligência equilibrada um razoável conhecimento do que aprendeu e propensão para estudar toda a vida, para não se desactualizar.

Num poema de Rudyard Kipling — IF — que todos os jovens deviam conhecer, estão bem sintetisadas as virtudes que deverá possuir um Homem com H maiúsculo e que será de desejar que ao engenheiro não faltem e, de uma forma geral, a qualquer chefe, digno deste nome.

Evidentemente, mesmo quando se não possua tão grande número de qualidades para enfrentar as lutas da vida, o tempo e uma certa determinação, podem permitir através de um processo de autoeducação, melhorar as que tivermos e conquistar as que nos faltem. É essencial, porém, termos confiança em nós próprios, sem exagerar nem minimizar o que valermos.

A meditação, a reflexão, o domínio dos nervos são bons exercícios para se atingir tal objectivo, sem esquecer que a persistência e combatividade são indispensáveis para vencer. Reservar, igualmente, algum tempo para a distracção do espírito.

Alguém pediu um dia a Einstein uma fórmula para vencer na Vida. O sábio ditou: $V = a + b$, esclarecendo: sendo V vencer na vida, a será o trabalho e b a diversão. A proporção em que este último factor deverá ser usado, depende de cada indivíduo e, por isso, não pode determinar-se de forma rígida.

Assim é, de facto. Tal como pessoas de temperamento nervoso necessitam de dormir muitas horas para se desintoxicarem, outras mais calmas dormem poucas, *dormem depressa*, sem deixar de acordar bem dispostas para o combate de cada dia. É, portanto, indispensável que procuremos conhecermo-nos a nós próprios para dosear a percentagem de diversão que o nosso espírito exige, para ser eficiente no trabalho.

A actividade de um engenheiro efectua-se, geralmente, em convívio com muita gente de formações e escala social extremamente diversas. É preciso um esforço de adaptação para que esse convívio se realize sem escusados atritos, porquanto a colaboração não se impõe, tem de ser prestada de boa vontade, para a boa marcha do conjunto. E o êxito do jovem engenheiro na fábrica, na oficina, no estaleiro ou nos serviços públicos, dependerá, em grande parte, das colaborações honestas que lhe forem prestadas.

Sempre que me dirijo a jovens engenheiros, não me canso nunca de lhes chamar a atenção para esta série de factores que vão influir grandemente na sua vida profissional e que nada têm de ver com a sua formação técnica.

Assim, ao ter de lidar com os seus superiores hierárquicos, por vezes de cultura muito inferior à sua, o engenheiro não deverá nunca pretender marcar uma superioridade que, ferindo susceptibilidades o torne incómodo. Terá de ser cortez, embora sem subserviência, apresentando os seus pontos de vista em linguagem acessível à inteligência e cultura dos outros. Muitos engenheiros, aliás inteligentes e competentes fracassam na vida profissional, apenas por falta de tacto.

Com os seus subalternos, mestres, contramestres e operários, não é menos necessário esse tacto, acrescido de paciência e de bondade para não criar melindres, sempre inconvenientes para as boas relações que é indispensável manter. A sua autoridade deve ser aceite naturalmente, sem necessidade de ser imposta. O engenheiro tem de saber auscultar os anseios dos seus subordinados, descobrir os motivos do seu descontentamento, evitar tudo o que possa perturbar a paz entre os que trabalham. Tem de ser chefe sem rudeza, fazer-se obedecer de boa vontade, ser bondoso mas firme. Uma palavra dita a tempo resolve muitas situações difíceis. A firmeza das suas ordens não deverá nunca excluir uma preocupação de humanidade.

Ele deve, porém, estar preparado para todas as surpresas.

Contava me um colega e amigo que tendo-lhe sido pedida pela administração de uma empresa que traçasse as bases de uma reorganização de serviços técnicos, ao apresentar o seu organigrama em que, naturalmente, o seu cargo surgia no lugar cimeiro, lhe foi feito o seguinte reparo:

— Mas então, pela nova Organização, nós não mandamos nada?

E tudo continuou como antes, isto é, desorganizado.

Por vezes, também, recorre-se ao engenheiro, «in extremis», esperando dele a solução de problemas quase insolúveis.

Durante a última guerra, numa fábrica que dirigi durante longos anos, uma bela manhã um dos administradores declara-me que dentro dos oito dias seguintes teria de deixar de trabalhar com determinada matéria-prima que, faltava e fora sempre a mais importante do processo de fabricação utilizado. Perante a minha reacção contra notícia tão insólita, o meu administrador com quem aliás me dei sempre bem, apesar da sua incultura total, respondeu-me apenas:

— Os engenheiros não se fizeram para outra coisa senão para inventar processos novos!

E despediu-se deixando-me perplexo perante tamanha inconsciência da gravidade do problema que me era posto, de repente e com a maior das simplicidades.

Nos oito dias que se seguiram e durante os quais quase não tive tempo para descansar, trabalhei no laboratório na resolução do problema, investigando, ensaiando, experimentando.

Por felicidade, conseguiu-se vencer a dificuldade e a fábrica não parou. Recordo hoje com emoção e saudade esse homem primário, já desaparecido, a quem fiquei devendo uma proveitosa lição que não esqueci em toda a minha vida.

De facto, os engenheiros fizeram-se também para inventar processos novos e todos através da sua acção profissional têm muitas vezes de inovar, descobrir soluções para problemas aparentemente insolúveis. Esta circunstância decide muitas vezes o rumo definitivo da nossa vida.

Todas as dificuldades que é necessário vencer na profissão de engenheiro têm uma contrapartida que constitui uma enorme compensação. Ele ocupa hoje um lugar proeminente no vértice da pirâmide social, graças a um prestígio que conquistou pela sua acção indispensável ao progresso dos povos, ao bem estar da humanidade. Neste século da técnica, o engenheiro é a vedeta mais admirada, mais procurada e mesmo, em geral, melhor remunerada.

Desde que exerça a profissão com competência e dignidade, todas as portas lhe estão abertas, incluindo as das posições de governo, se para isso se sentir inclinado.

À nova geração de engenheiros compete uma tarefa dura, mas cheia de interesse, tantos são os problemas que há para resolver neste mundo perturbado em que vivemos. E não é dos menores aquele que resulta do constante aumento das populações, aquilo a que se tem chamado a explosão demográfica e que, representado gràficamente, se assemelha grandemente com o cogumelo duma bomba atómica. Isto quando três quartas partes da população do mundo estão subalimentadas e se prevê que no fim deste século a humanidade conte 6 ou 7 biliões de almas, o dobro da actual população!

Espera-se anciosamente dos engenheiros, em particular dos químicos e bioquímicos, a solução deste problema crucial de alimentar, vestir e calçar todos esses biliões de famintos. Espera-se da investigação científica e tecnológica, da produtividade das fábricas e da agricultura o milagre. Não sei se a ciência e a engenharia terão o tempo suficiente para, nestes 33 anos que faltam para terminar o século, resolver tão grave problema, mas vale a pena travar o combate e tentar tudo para que não sossobre uma civilização conquistada à custa de sangue, suor e lágrimas.

Eu sou um velho engenheiro já prestes a abandonar não só a carreira mas também a vida, sabendo de antemão que não chegarei a ver o desfecho deste drama que a Humanidade está vivendo. Tenho, porém, fé ilimitada na juventude que há-de substituir os da minha geração.

Tenho fé nos engenheiros que esta grande Escola forma e que dentro em breve ocuparão os postos de comando no nosso país. Será árdua a luta que vão travar com a vida mas também cheia de interesse e certamente de compensações, se souberem bem aplicar o que aprenderam e lutar sem desfalecimentos, confiados nas suas possibilidades.

Vou terminar aproveitando o ensejo para vos agradecer o amável convite que aqui me trouxe e afirmar que é sempre com a maior satisfação que me associo a estas manifestações culturais de finalistas, por elas representarem não só uma homenagem de amizade, respeito e admiração aos Professores que os preparam para as batalhas da vida, como também a prova clara de que têm a plena consciência das responsabilidades que vão suportar.

Com efeito, ao chegar o momento de nos separarmos da Escola para entrarmos no exercício da profissão, bom é não esquecermos que à Escola ficamos vinculados para sempre e que os nossos mestres de ontem, colegas de amanhã, serão através da vida os melhores conselheiros e amigos, a quem poderemos recorrer nas nossas dificuldades, recolhendo deles a boa palavra que nos restitua a confiança em nós mesmos, quando esta se sinta abalada.

Concluo pedindo-vos que me absolvam de tanto me ter alongado nesta descolorida oração e repetindo as palavras que disse na sessão de encerramento da Semana de Engenharia Electrotécnica: «que a vida vos reserve as maiores felicidades e vos permita honrar e prestigiar a nossa nobre profissão são os votos mais sinceros de quem, ao cabo de 45 anos de vida profissional se orgulha mais que nunca de ser engenheiro.»

C. D. U. 621.311.5/91

ELEMENTOS SOBRE A PRODUÇÃO E O CONSUMO DE ENERGIA NA REDE ELÉCTRICA NACIONAL (*)

I — Breve nota mensal

As afluências ao conjunto do sistema, exceptuados os aproveitamentos do Douro Internacional registaram uma ponta da ordem dos 40 GWh/dia (no dia 8) após o que mantiveram uma tendência decrescente, apenas quebrada no final do mês por efeito das chuvas então ocorridas. Quanto aos aproveitamentos do Douro Internacional, regista-se que o caudal natural (Douro + + Esla), depois de apresentar uma ponta da ordem dos 900 m^3/s (no dia 11), decresceu contìnuamente, situando-se no final de Março em cerca de 250 m^3/s.

No conjunto de todos os aproveitamentos, as afluências do mês de Março têm uma probabilidade de serem excedidas da ordem dos 62 %. O coeficiente de produtibilidade do mês foi de 0,86.

II — Elementos gerais (GWh)

	a) Mensais 1966	a) Mensais 1967	Variação %
Produção hidráulica (P_h) . . .	453,9	475,1	+ 5
Produção térmica (P_t)	0,0	3,2	—
Produção total (P_T)	453,9	478,3	+ 5
Energia recebida de empresas não pertencentes ao RNC (E_r)	4,0	3,6	— 10
Exportações (Ex)	0,0	0,0	0
Importações (I)	0,0	0,0	0
Saldo importador (S_I)	0,0	0,0	0
Consumo em bombagem (C_D) . .	10,8	9,1	— 16
Produção para consumos perman. (P_{cp})	369,0	390,3	(1) + 5,8
Produção para consumos não perman. (P_{cnp}) . . .	78,1	82,5	+ 6
Total	457,9	481,9	+ 5
Coeficiente de hidraulicidade	0,81	0,86	—

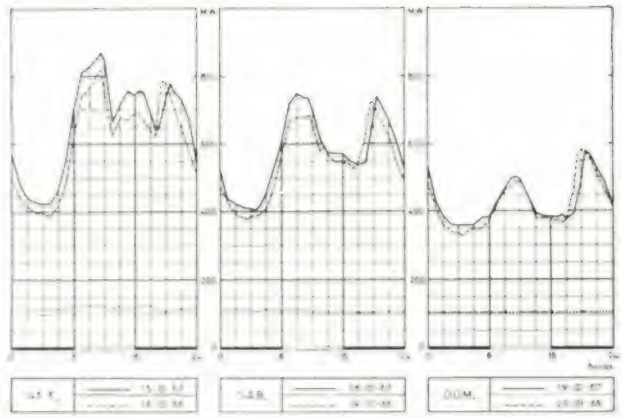
NOTA

(1) O aumento percentual da produção para consumos permanentes, tendo em conta a incidência dos domingos e dias especiais, é respectivamente de 7,6 e 13,4 %.

III — Diagramas de carga dos dias característicos

			4.ª feira: 1966	4.ª feira: 1967
Produção hidráulica		(P_h) MWh	16322	15892
Produção térmica		(P_t) MWh	0	0
Produção total		(P_T) MWh	16322	15892
Trocas com Espanha	Export.	(Ex) MWh	0	0
	Import.	(I) MWh	0	0
Consum em bomb. hidroel.		(C_b) MWh	1410	0
Prod. para cons. perm.		(P_{cp}) MWh	12386	13107
Prod. para cons. não perm.		(P_{cnp}) MWh	2526	2785
TOTAL		$P_T + (I-Ex)$ MWh	14912	15892
Características dos diagramas	$P_T + (I-Ex)$	Potência máx. MW	817	866
		Potência mín. MW	392	423
		Utiliz. da ponta horas	18,3	18,4
		Factor de carga	0,76	0,76
	P_{cp}	Potência máx. MW	711	745
		Potência mín. MW	286	308
		Utiliz. da ponta horas	17,4	17,6
		Factor de carga	0,73	0,73

MARÇO



IV — Energia armazenada nas principais albufeiras

Albufeiras:	No fim do mês GWh	No fim do mês % (1)
Alto Rabagão	972,2	99,9
Paradela	221,5	99,6
Venda Nova	121,8	95,2
Salamonde	26,6	96,4
Caniçada	32,1	97,0
Vilar	80,2	86,6
Cabril	306,5	90,3
Castelo do Bode	148,4	91,0
Guilhofrei	7,7	92,8
Lagoa Comprida	24,4 (2)	71,4
Santa Luzia	41,8	72,7
Pracana	10,1	78,3
Póvoa	9,6 (3)	66,3
Total { com A. Rabagão . . .	2005,9	95,1
Total { sem A. Rabagão . . .	1033,7	91,0

NOTAS

(1) Coeficiente de enchimento em energia das albufeiras.

(2) Inclui 3,4 GWh armazenados em Vale do Rossim no início do mês e 3,4 GWh no fim do mês.

(3) Inclui 2,4 GWh armazenados no açude do Poio no início do mês e 2,7 GWh no fim do mês.

(*) *Elementos extraídos das estatísticas mensais do Repartidor Nacional de Cargas (R. N. C.). As produções e os consumos das empresas do R. N. C. representam cerca de 94 % dos totais do País.*

MAGUE

"PONTE ROLANTE ELÉCTRICA COM COLHER DE 25 t/30 m EM SERVIÇO NAS INSTALAÇÕES DA COMPANHIA DE CIMENTOS TEJO, EM ALHANDRA"

PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS — *Projecto e fabrico*

TURBINAS HIDRÁULICAS — *Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.*

TURBINAS A VAPOR — *Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.*

CALDEIRAS A VAPOR — *Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.*

EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

aglomerado negro de cortiça

leve, resistente e isolante
ideal para elementos pré-fabricados

ISOLA

SOC. COM. DE ISOLAMENTOS

DE CORTIÇA, Lda

Avenida António Augusto de Aguiar, 17

Telef. 537191/2/3/4

LISBOA — PORTUGAL

Só

Araldite - o ligante mais forte que se conhece

Liga para sempre
Aço
Metais
Vidro
Borracha
Cerâmica
Plásticos
(não maleável)
e todo o material de uso corrente

★ Indispensável em casa e na oficina, **ARALDITE**, o ligante do engenheiro, usado na aviação a jacto.

★ Liga materiais da mesma natureza e de natureza diferente.

Um produto suíço da CIBA

Resiste a
Calor
Humidade
Solventes
Ácidos

À VENDA NAS DROGARIAS E PAPELARIAS

C. D. U. 621.313

LA THEORIE DYNAMIQUE DES MACHINES ELECTRIQUES

par MANUEL S. GARRIDO
Boursier de l'I. A. C., Lisbonne
Lab. Electrotechnique,
E. N. S. E. M., Nancy

RESUMO

As equações de Lagrange não são aplicáveis às máquinas eléctricas de comutação e à roda de Barlow.

Partindo da lei da indução mostra-se como modificar as equações de modo que elas sejam aplicáveis àquele tipo de sistemas.

O método é aplicável a máquinas saturadas com uma distribuição qualquer de campo magnético.

SYNOPSIS

Lagrange's equations are not applicable to commutator machines or to Faraday disc.

Starting with the induction law it is shown how to modify the equations in such a way that they become applicable to that kind of system.

The method is applicable to saturated machines with any magnetic field distribution.

A — INTRODUCTION

Le besoin d'intégrer les machines électriques dans des systèmes de plus en plus complexes et les problèmes posés par les techiques de contrôle automatique ont conféré une importance spéciale à la «théorie dynamique des machines électriques».

Cette théorie considère les machines électriques comme un systeme dynamique dont le comportement intime n'offre pas d'intérêt, l'objectif étant de pouvoir déterminer les équations de mouvement uniquement à partir des variables et paramètres mesurés aux terminaux de la machine.

Maxwell a établi l'esprit de cette théorie en supposant que les équations de Lagrange sont applicables aux systèmes électromécaniques [1].

L'hypothèse de Maxwell est parfaitement confirmée dans un grand nombre de machines, que nous allons appeller à «connexions fixes»: on peut citer les transformateurs, les machines asynchrones et les machines synchrones.

Pourtant il y a un groupe important de machines, que nous appellerons à «connexions variables» qui échappent à la méthode de Maxwell: ce sont les machines à commutation (mécanique ou électronique) et les systèmes du type roue de Barlow, qui possèdent des contacts glissants.

Plusieurs tentatives ont été faites pour interpréter ou résoudre cette difficulté [2], [3], [4], [5], [6]. La plus connue est celle de G. Kron [7] qui cherche dans la géométrie la résolution du problème.

Pourtant la théorie de Kron présente des difficultés si on envisage son application à des machines avec une distribution absolument quelconque de champ magnétique [8] et à des machines saturées.

L'objetif de ce travail est de montrer comment on peut généraliser la méthode de Maxwell aux machines à «connexions variables» quelle que soit la distribution de champ magnétique et que la machine soit saturée ou non.

L'analyse sera limitée à des machines avec des courants linéiques, ce qui exclura une étude générale de la roue de Barlow.

Les machines seront supposées dépourvues d'hystérésis, ce qui est une des hypothèses de base des méthodes de la dynamique analytique et les pertes de Foucault seront négligées. Ces faits n'empêchent pas que, dans certains cas, les pertes dans le fer puissent être ajoutées a posteriori aux résultats.

On se limitera aux machines à couplage magnétique, en faisant l'hypothèse que l'énergie électrostatique est négligeable.

Dans l'analyse qui va suivre on admettra que chaque circuit électrique se distribue sur plusieurs «armatures» (éléments mécaniques).

Cette hipothèse nous permet de traiter directement l'association en série de plusieurs machines classiques, telles qu'elles peuvent exister sur une branche d'un réseau maillé.

Les multiplicateurs de Lagrange ou les équations de Bolzmann-Hamel pourraient ensuite être utilisés pour établir les équations du réseau.

L'hypothèse est encore nécessaire si on veut étudier le circuit induit d'une machine du type roue de Barlow, car dans ce cas les conducteurs extérieurs participent activement au fonctionnement et constituent un sistème mécanique indépendant du rotor.

B — LES MACHINES A CONNEXIONS FIXES.

Les équations dynamiques des machines électriques peuvent être obtenues par deux voies formellement différentes [9]. La première utilise le principe de conservation de l'énergie combiné aux lois du champ électromagnétique. La deuxiéme, qui constitue l'objectif essentiel de ce travail, utilise les méthodes variationelles appliquées à des fonctions d'énergie convenablement choisies.

1 — *Déduction des équations de mouvement à partir du principe de conservation de l'énergie.*

Le principe de conservation de l'énergie combiné avec les lois de Kirchhoff et le principe de d'Alembert se prête bien à l'étude des machines électriques.

Les approximations de l'état quasi stationnaire sont valables et le principe de conservation de l'energie nous permet d'écrire pour tout déplacement du système:

$$(1)\qquad \left[\begin{array}{l}\text{Energie reçue}\\ \text{des sources}\\ \text{électriques}\end{array}\right] + \left[\begin{array}{l}\text{Energie reçue}\\ \text{des sources}\\ \text{mécaniques}\end{array}\right] = \left[\begin{array}{l}\text{Augmentation}\\ \text{d'énergie}\\ \text{magnétique + mécanique}\end{array}\right] + \left[\begin{array}{l}\\ \text{Pertes}\\ \\ \end{array}\right]$$

Il n'y a pas, dans la conversion électromécanique d'énergie, une dégradation systématique d'énergie dans le sens de la thermodynamique. Les pertes sont de nature «organique» et on ne perd pas de signification physique si on les associe directement aux sources extérieures en écrivant:

$$(2)\qquad \left[\begin{array}{l}\text{Energie reçue}\\ \text{des sources électriques-}\\ \text{-pertes Joule}\end{array}\right] + \left[\begin{array}{l}\text{Energie reçue des}\\ \text{sources mécaniques-}\\ \text{-pertes frottement}\end{array}\right] = \left[\begin{array}{l}\text{Augmentation de}\\ \text{l'énergie}\\ \text{magnétique + mécanique}\end{array}\right]$$

Dans cette expression on a ignoré les pertes de Foucault et par hystérésis.

Admettons que le système possède p circuits éléctriques indépendants et que sa configuration est definie par r coordonées géométriques indépendantes. Les différentes conditions de liaison qui peuvent exister, dans la pratique (p. ex. la mise en parallèle de l'inducteur et de l'induit dans une machine shunt) ne constituent pas un élément essentiel dans le processus de conversion de l'énergie.

On va affecter avec les indices a, b... les variables électriques et avec les indices u, v... les les variables mécaniques. Un indice grec $\alpha, \beta, \gamma \ldots$ désignera, indifféremment, une des variables électriques et mécaniques.

On va utiliser comme variables indèpendantes les courants i_a dans les circuits et les coordonnées q_u définissant la configuration géométrique du systéme électromécanique.

On aura encore à considérer les flux ψ_a, les tensions appliquées $v_a = Q_a$ et les forces généralisées mécaniques $\Gamma_u = Q_u$.

Les équations électriques du systeme peuvent être obtenues par application des lois de Kirchhoff et Faraday. Si v_a désigne la tension appliquée au circuit a et R_a sa résistance, on peut écrire

$$v_a - R_a\, i_a = \frac{d\,\psi_a}{dt} \tag{3}$$

Pour établir les équations mécaniques, on utilisera une méthode de déplacement arbitraire combinée avec le principe de conservation de l'énergie.

Désignons par dq_u un déplacement arbitraire infinitésimal du système selon la coordonnée q_u pendant le temps dt, les déplacements selon les autres coordonnées mécaniques étant nuls, pour simplifier. Les conducteurs sont considérés filiformes, de façon que les filets de courant accompagnent la matière dans son déplacement. Soient Γ_u la force appliquée selon la coordonnée q_u, α_u le coefficient de dissipation, T_E l'énergie magnétique et T_M l'énergie cinétique mécanique pendant le déplacement arbitraire.

La relation (2) s'écrit alors

$$\sum_{a=1}^{p} (v_a - R_a\, i_a)\, i_a\, dt + (\Gamma_u - \alpha_u\, \dot{q}_u)\, dq_u = dT_E + dT_M \tag{4}$$

Cette équation peut être transformée d'après (3) et écrite

$$(\Gamma_u - \alpha_u\, \dot{q}_u)\, dq_u = -\sum_{a=1}^{p} i_a\, d\psi_a + dT_E + dT_M \tag{5}$$

L'énergie magnétique est une fonction des courants et coordonnées géometriques. Alors

$$dT_E = \frac{\partial T_E}{\partial q_u}\, dq_u + \sum_{a=1}^{p} \frac{\partial T_E}{\partial i_a}\, di_a \tag{6}$$

Les variations de flux $d\psi_a$ peuvent être écrites, aussi

$$d\psi_a = \frac{\partial \psi_a}{\partial q_u}\, dq_u + \sum_{b=1}^{p} \frac{\partial \psi_a}{\partial i_b}\, di_b \tag{7}$$

Ces resultats nous permettent d'écrire équation (5) sous la forme

$$(\Gamma_a - \alpha_u\, \dot{q}_u)\, dq_u = dT_M + \frac{\partial T_E}{\partial q_u}\, dq_u - \sum_{a=1}^{p} i_a \frac{\partial \psi_a}{\partial q_u}\, dq_u - \tag{8}$$

$$- \sum_{a=1}^{p} i_a \left(\sum_{b=1}^{p} \frac{\partial \psi_a}{\partial i_b}\, di_b \right) + \sum_{a=1}^{p} \frac{\partial T_E}{\partial i_a}\, di_a$$

Si on interchange les indices dans les deux derniers termes, on obtient :

$$(\Gamma_u - \alpha_u\, \dot{q}_u)\, dq_u = dT_M + \left(\frac{\partial T_E}{\partial q_u} - \sum_{a=1}^{p} i_a \frac{\partial \psi_a}{\partial q_u} \right) dq_u + \sum_{a=1}^{p} \left(\frac{\partial T_E}{\partial i_a} - \sum_{b=1}^{p} i_b \frac{\partial \psi_b}{\partial i_a} \right) di_a \tag{9}$$

Les coefficientes des di_a sont nuls. Pour le vérifier, considérons l'expression de l'energie magnétique :

$$T_E = \int_{0 \ldots 0}^{\psi_1, \ldots \psi_p} \sum_{b=1}^{p} i_b\, (\psi_1 \ldots\ldots \psi_p;\ q_{p+1} \ldots\ldots q_n)\, d\psi_b \tag{10}$$

L'intégrale (10) est calculée avec les $q_u = q_{p+1} \ldots\ldots\ldots q_n$ constants. Si on intégre par parties, on obtient

$$(11) \qquad T_E = \sum_{b=1}^{p} i_b \psi_b - \int_{o \ldots o}^{i_1 \ldots i_p} \sum_{b=1}^{p} \psi_b (i_1 \ldots\ldots i_p ; q_{p+1} \ldots\ldots q_n) \, d i_b$$

Ce résultat nous permet de calculer les coefficients des di_a :

$$(12) \qquad \frac{\partial T_E}{\partial i_a} - \sum_{b=1}^{p} i_b \frac{\partial \psi_b}{\partial i_a} = \sum_{b=1}^{p} i_b \frac{\partial \psi_b}{\partial i_a} + \psi_a - \psi_a - \sum_{b=1}^{p} i_b \frac{\partial \psi_b}{\partial i_a} = 0$$

Alors, équation (9) se réduit à

$$(13) \qquad (\Gamma_u - \alpha_u \dot{q}_u) \, d q_u = d T_M + \left(\frac{\partial T_E}{\partial q_u} - \sum_{a=1}^{p} i_a \frac{\partial \psi_a}{\partial q_u} \right) d q_u$$

laquelle est indépendante de la façon dont i_a et ψ_a sont en train de varier dans le système avec le temps.

Les équations de la mécanique nous permettent d'écrire que la variation d'énergie cinétique $d T_M$ associée au déplacement arbitraire est donnée par

$$(14 \qquad d T_M = \sum_{v} \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial T_M}{\partial \dot{q}_v} \frac{\partial T_M}{\partial q_v} \right) dq_v = \left(\frac{d}{d t} \frac{\partial T_M}{\partial \dot{q}_u} - \frac{\partial T_M}{\partial q_u} \right) d q_u$$

Ce résultat nous permet, enfin, d'écrire l'équation (13) sous la forme :

$$(15) \qquad \Gamma_u = \frac{d}{d t} \frac{\partial T_M}{\partial \dot{q}_u} - \frac{\partial T_M}{\partial q_u} + \frac{\partial T_E}{\partial q_u} - \sum_{a=1}^{p} i_a \frac{\partial \psi_a}{\partial q_u} + \alpha_u \dot{q}_u$$

L'équation (15) s'applique aussi au mouvement réel, T_M répresentant alors l'énergie cinétique sur la trajectoire réelle.

Cette équation a été obtenue en utilisant les courants et coordonnées géométriques comme variables indépendantes. Il est plus commode dans ce cas, d'utiliser comme fonction d'énergie la coénergie magnétique définie par

$$(16) \qquad T'_E = \int_{o \ldots o}^{i_1 \ldots i_p} \sum_{a=1}^{p} \psi_a (i_1 \ldots\ldots i_p ; q_{p+1} \ldots\ldots q_n) \, d i_a$$

l'intégration étant réalisée avec les q_u constants.

En fonction de la coénergie magnétique, équation (15) s'écrira

$$(17) \qquad \Gamma_u = \frac{d}{d t} \frac{\partial T_M}{\partial \dot{q}_u} - \frac{\partial T_M}{\partial q_n} - \frac{\partial T'_E}{\partial q_u} + \alpha_u \dot{q}_u$$

qui constitue l'équation mécanique cherchée. La dérivée $\frac{\partial T'_E}{\partial q_u}$ est calculée avec $i_a = C.^t$, condition mathématique résultante du fait qu'on a pris les i_a et les q_u comme variables indépendantes. Il ne faut pas confondre cette condition avec une condition physiquement imposée au système : l'équation (17) est générale et indépendante de la façon dont i_a est en train de changer avec le temps.

Si le système en étude est linéaire, les flux sont des fonctions linéaires des courants :

$$(18) \qquad \psi_b = \sum_{a=1}^{p} L_{ab} \, i_a$$

$L_{ab} = L_{ba}$ représentant les coefficients d'induction.

L'expression de la coénergie magnétique sera alors, d'après (16)

$$T'_E = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^{p} \sum_{b=1}^{p} L_{ab}\, i_a\, i_b \tag{19}$$

Si on introduit les expressions (18) et (19) dans l'équation (11), qui nous definit l'énergie magnétique en fonction de la coénergie, on obtient :

$$T_E = \sum_{b=1}^{p} \sum_{a=1}^{p} L_{ab}\, i_a\, i_b - \frac{1}{2} \sum_{a=1}^{p} \sum_{b=1}^{p} L_{ab}\, i_a\, i_b = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^{p} \sum_{b=1}^{p} L_{ab}\, i_a\, i_b = T'_E \tag{20}$$

Alors, dans un système linéaire l'énergie et la coénergie magnétiques sont égales, et peuvent être utilisées indifféremment dans l'éq. (17) à condition qu'on conserve comme variables indépendantes les courants et les coordonnées mécaniques.

2 — *Déduction des équations de mouvement à partir du principe d'Hamilton.*

Maxwell a admis que les méthodes de la dynamique analytique étaient applicables aux systèmes électromécaniques.

Désignons par q_a la charge électrique qui a traversé une section d'un circuit, telle que $i_a = \dot{q}_a = \frac{dq_a}{dt}$ représente le courant du circuit.

L'idée de Maxwell est qu'un réseau électrique peut être regardé comme un système dynamique caractérisé par les coordonnées généralisées q_a ($a = 1 \ldots\ldots\ldots p$).

Dans les machines électriques les circuits sont associés à des systèmes mêcaniques de façon qu'il y ait un échange d'énergie entre les deux systèmes. Dans ce cas l'ensemble constitue un seul système dynamique.

Aux p coordonnées électriques q_a il faut ajouter les coordonnées généralisées du système mécanique q_u ($u = p + 1 \ldots\ldots\ldots n$).

Il se pose maintenant le problème de trouver les fontions d'énergie qu'on va utiliser pour appliquer le principe d'Hamilton, ce qui parfois doit être fait par tâtonnement [10].

Les résultats obtenus par le principe de conservation de l'énergie nous guident dans ce choix.

Comme fonction d'énergie mécanique on utilisera l'énergie cinétique T_M du système mécanique, la notion de coénergie ne se dégageant que lorsqu'on passe au domaine de la mécanique relativiste [11].

Comme fonction d'énergie électromagnétique on devra utiliser la coénergie magnétique T'_E du système. L'équation (17) montre que, lorsqu'on utilise comme variables indépendantes, les coordonnées mécaniques et les courants électriques, la fonction T'_E est de même nature dynamique que l'énergie cinétique [12]. C'est l'analogie de Maxwell que nous allons utiliser dans tout ce travail.

Maxwell a fait des expériences [1] qui permettent de conclure à la non existence de fonctions d'intéraction entre les systèmes électromagnétique et mécanique.

Alors, on est en situation de définir une coénergie cinétique généralisée du système electromécanique, fonction des coordonnées et vitesses genéralisées,

$$T'(\dot{q}_1 \ldots\ldots \dot{q}_n ;\, q_{p+1} \ldots\ldots q_n) = T_M + T'_E \tag{21}$$

que nous allons utiliser comme fonction d'état du système, pour appliquer le principe d'Hamilton.

On va admettre encore qu'il y a une fonction de dissipation $F(\dot{q}_1 \ldots\ldots \dot{q}_n ;\, q_1 \ldots\ldots\ldots q_n)$ telle que la force de dissipation selon une coordonnée q_γ soit $\frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma}$.

Cette force de dissipation sera associée à la force généralisée Q_γ. Pour cela, on introduit une fonction W telle que

$$\delta W = \sum_{\gamma=1}^{n} \left(Q_\gamma - \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma} \right) \delta q_\gamma \tag{22}$$

représente le travail virtuel de toutes les forces appliquées et de dissipation pour les déplacements virtuels δq_γ.

Le principe d'Hamilton est formellement généralisable aux systèmes non conservatifs [13] et c'est cette généralisation qui nous intéresse pour l'établissement des équations de mouvement des systèmes électromécaniques.

Dans ce cas, le principe prend la forme

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T' + W) dt = 0 \tag{23}$$

δ représentant une variation à extrêmes fixes.

L'équation (23) peut être développée en deux termes:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T' + W)\, dt = \delta \int_{t_1}^{t_2} T' dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt \tag{24}$$

D'après un résultat du calcul des variations [9], [10] on a

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} T' dt = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{\gamma=1}^{n} \left(\frac{dT'}{\partial q_\gamma} - \frac{d}{dt} \frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_\gamma} \right) \delta q_\gamma\, dt \tag{25}$$

D'autre part, l'éq. (22) nous permet d'établir que:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta W\, dt = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{\gamma=1}^{n} \left(Q_\gamma - \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma} \right) \delta q_\gamma\, dt \tag{26}$$

Les résultats permettent, enfin, d'écrire l'éq. (23) sous la forme

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum_{\gamma=1}^{n} \left(\frac{\partial T'}{\partial q_\gamma} - \frac{d}{dt} \frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_\gamma} + Q_\gamma - \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma} \right) \delta q_\gamma\, dt = 0 \tag{27}$$

Nous avons admis déjà que le système avait été dégagé de toute liaison externe entre les coordonnées, les terminaux électriques et mécaniques étant tous indépendants. Pourtant, il faut se demander encore s'il y a des conditions de liaison internes entre les coordonnées. Maxwell a admis, implicitement, qu'il n'y a pas de telles conditions et que l'équation (27) est valable sans faire aucune restriction sur les variations δq_γ.

Dans ces conditions les δq_γ sont arbitraires et l'éq. (27) ne sera satisfaite que si les coefficients des δq_γ sont nuls.

Cette conclusion nous permet d'écrire les équations de mouvement.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_\gamma} - \frac{\partial T'}{\partial q_\gamma} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma} = Q_\gamma \qquad \gamma = 1 \ldots\ldots n \tag{28}$$

qui sont les équations de Lagrange du système électromecanique.

Ces équations coïncident avec celles qu'on a établi par le principe de conservation de l'énergie, mais leur champ d'application est plus vaste. En fait, elles pourront être généralisées aux systèmes avec des liaisons externes dépendant du temps, alors que le principe de conservation de l'énergie n'est plus utilisable [11] [14].

Quand le système est linéaire la coénergie magnétique prend la forme

$$T'_E = T_E = \frac{1}{2} \sum_{a,b} L_{ab}\, i_a\, i_b \tag{29}$$

les coefficients d'induction étant fonction, en général, des coordonnées mécaniques q_u.

L'énergie cinétique mécanique est

$$T_M = \frac{1}{2} \sum_{u,v} J_{uv}\, \dot{q}_u\, \dot{q}_v \tag{30}$$

J_{uv} représentant les produits d'inertie.

Alors la coénergie cinétique généralisée prend la forme:

$$T' = T = \frac{1}{2} \sum_{\alpha,\beta} a_{\alpha\beta}\, \dot{q}_\alpha\, \dot{q}_\beta \tag{31}$$

De même, dans un système linéaire la fonction de dissipation prend la forme

$$F = \frac{1}{2} \sum_{\alpha,\beta} K_{\alpha\beta}\, \dot{q}_\alpha\, \dot{q}_\beta \tag{32}$$

les $K_{\alpha\beta}$ représentant les résistances électriques et les coefficients de dissipation mécanique.

Les expressions (31) et (32) permettent d'écrire les équations de mouvement (28) sous une autre forme.

Pour cela, développons les différeents termes de (28).

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_\gamma} = \frac{d}{dt}\left(\sum_\beta a_{\gamma\beta}\, \dot{q}_\beta\right) = \sum_\beta a_{\gamma\beta}\, \ddot{q}_\beta + \sum_{\alpha,\beta} \frac{\partial a_{\gamma\beta}}{\partial q_\alpha}\, \dot{q}_\alpha\, \dot{q}_\beta\,;\quad \frac{\partial T'}{\partial q_\gamma} = \frac{1}{2} \sum_{\alpha,\beta} \frac{\partial a_{\alpha\beta}}{\partial q_\gamma}\, \dot{q}_\alpha\, \dot{q}_\beta\,;\quad \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma} = \sum_\beta K_{\lambda\beta}\, \dot{q}_\beta$$

Si on utilise ces résultats, éqs. (28) prennent la forme

$$\sum_\beta a_{\gamma\beta}\, \ddot{q}_\beta + \sum_{\alpha,\beta} \left(\frac{\partial a_{\gamma\beta}}{\partial q_\alpha} - \frac{1}{2}\frac{\partial a_{\alpha\beta}}{\partial q_\gamma}\right) \dot{q}_\alpha\, \dot{q}_\beta + \sum_\beta K_{\gamma\beta}\, \dot{q}_\beta = Q_\gamma \tag{33}$$

Enfin, si on introduit le symbole de Christoffel de 1ère espèce défini par

$$\left[\alpha\, \beta,\, \gamma\right] = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial a_{\alpha\gamma}}{\partial q_\beta} + \frac{\partial a_{\gamma\beta}}{\partial q_\alpha} - \frac{\partial a_{\alpha\beta}}{\partial q_\gamma}\right) \tag{34}$$

équation (33) peut être écrite

$$\sum_\beta a_{\gamma\beta}\, \ddot{q}_\beta + \sum_{\alpha,\beta} [\alpha\, \beta,\, \gamma]\, \dot{q}_\alpha\, \dot{q}_\beta + \sum_\beta K_{\gamma\beta}\, \dot{q}_\beta = Q_\gamma \tag{35}$$

qui est une forme souvent utilisée des équations de mouvement (28).

C — LES MACHINES A CONNEXIONS VARIABLES

1 — *Introduction*

Malgré la grande généralité des méthodes décrites dans la première partie, elles ne sont pas applicables à toutes les machines. L'exception la plus importante est constituée par les machines à commutation, mécanique ou eléctronique.

Considérons une machine à courant continu classique, non saturée, avec un grand nombre de «sections» à l'induit. Soient L_1 le coefficient d'auto-induction de l'inducteur, L_2 celui de l'induit et M_{12} l'inductance mutuelle. Appelons Θ_2 la coordonnée de position du rotor et Θ_1 celle du stator.

Si le stator est en repos dans le référenciel de l'observateur ($\dot{\Theta}_1 = 0$), l'application des équations de Lagrange (28) conduit aux résultats suivants :

$$L_1 \frac{d i_1}{d t} + M_{12} \frac{d i_2}{d t} + \boxed{i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2} + R_1 i_1 = v_1 \tag{36-a}$$

$$L_2 \frac{d i_2}{d t} + M_{12} \frac{d i_1}{d t} + i_1 \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + \boxed{i_2 \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2} + R_2 i_2 = v_2 \tag{36-b}$$

$$J_2 \frac{d^2 \Theta_2}{d t^2} + \alpha_2 \frac{d \Theta_2}{d t} - \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2} i_2^2 - \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} i_1 i_2 = \Gamma_2 \tag{36-c}$$

$$- \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_1} i_2^2 - \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_1} i_1 i_2 = \Gamma_1 \tag{36-d}$$

Dans l'obtention de ces équations on a tenu compte du fait que $\frac{\partial L_1}{\partial \Theta_1} = \frac{\partial L_1}{\partial \Theta_2} = 0$ parce que le rotor est lisse.

Les équations (36-a,b) sont incorrectes à cause des termes signalés. En fait, l'expérience montre qu'il n'y a pas de f. e. m. motionelle dans l'inducteur. En plus, le terme signalé dans l'éq. (36-b) devrait avoir la valeur $\frac{1}{2} i_2 \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2$.

Ces différences proviennent du fait qu'on n'a pas considéré les sections en commutation de la machine [5]. Or, ces sections sont équivalentes à un nouvel enroulement c dans l'induit mis en court-circuit par les balais. C'est la prise en considération de cet enroulement qui nous permettra de corriger les équations (36).

1 — 1 — *Analyse des équations des machines à courant continu.*

Considérons la machine précédente. Soit T_c le temps de commutation de la machine, la commutation étant supposée du tipe «simple». Pendant l'intervalle de temps $(+ O, T_c - O)$ il n'y a pas de commutation de circuits et les équations (28) doivent être applicables.

L'énergie cinétique généralisée de la machine est

$$T = \frac{1}{2} J \dot{\Theta}^2 + \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + M_{12} i_1 i_2 + M_{1c} i_1 i_c + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M_{2c} i_2 i_c + \frac{1}{2} L_c i_c^2 \tag{37}$$

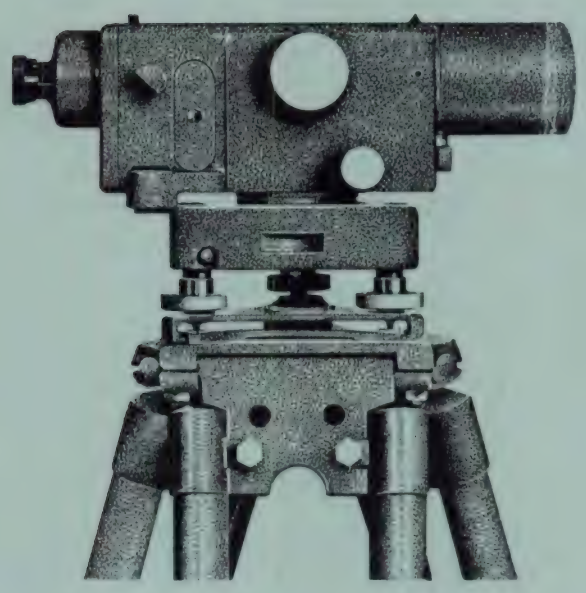
L'application des équations (28) conduit aux résultats suivants :

$$L_1 \frac{d i_1}{d t} + M_{12} \frac{d i_2}{d t} + i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + M_{1c} \frac{d i_c}{d t} + i_c \frac{\partial M_{1c}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + R_1 i_1 = v_1 \tag{38-a}$$

O novo Nível automático de engenheiro

WILD NAK 2

com círculo horizontal



WILD
HEERBRUGG

Para nivelamentos de média e grande precisão; com micrómetro de lâmina de faces planc-paralelas para nivelamentos de grande precisão.

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo: ± 1,5 mm

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo com micrómetro: ± 0,4 mm

Luneta de 30 × de aumento com imagem direita de observação

Solicitem catálogo ou demonstração aos representantes exclusivos

WILD PORTUGAL, LDA.

PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8
LISBOA - 2 — TELEFONE 68 11 27

DESPOEIRAGEM

FILTROS TECIDOS EM PEÇAS, PANOS, SACOS, MANGAS

DE QUALQUER FIBRA NATURAL OU SINTÉTICA

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEF.: 52093–52094
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português

DELEGAÇÃO - LISBOA
R.S.Pedro de Alcântara, 1
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
Rua Serpa Pinto, 60
C.P.2178 - Tel.4226

MOÇAMBIQUE
L.Marques - C.P.982 - Tel.741121
Beira - C.P. 1002 - Tel. 71497

$$(38\text{-b}) \qquad L_2 \frac{d i_2}{d t} + M_{12} \frac{d i_1}{d t} + i_2 \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + i_1 \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + M_{2c} \frac{d i_c}{d t} + i_c \frac{\partial M_{2c}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + R_2 i_2 = v_2$$

$$(38\text{-c}) \qquad J_2 \frac{d^2 \Theta_2}{d t^2} + \alpha_2 \frac{d \Theta_2}{d t} - \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2} i_2^2 - \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} i_1 i_2 - \frac{\partial M_{1c}}{\partial \Theta_2} i_1 i_c - \frac{\partial M_{2c}}{\partial \Theta_2} i_2 i_c - \frac{1}{2} \frac{\partial L_c}{\partial \Theta_2} i_c^2 = \Gamma_2$$

A ces équations, il faut ajouter l'équation de commutation :

$$(38\text{-d}) \qquad L_c \frac{d i_c}{d t} + M_{1c} \frac{d i_1}{d t} + M_{2c} \frac{d i_2}{d t} + i_c \frac{\partial L_c}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + i_1 \frac{\partial M_{1c}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + i_2 \frac{\partial M_{2c}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + R_c i_c = 0$$

Le courant de commutation i_c doit s'inverser pendant l'intervalle $(+ O, T_c - O)$, même si cela arrive forcément à la fin de cet intervalle.

Analysons d'abord l'équation (38-a). Le flux à travers le circuit inducteur est

$$(39) \qquad \psi_1 = L_1 i_1 + M_{12} i_2 + M_{1c} i_c$$

L'inversion du courant de commutation oblige à ce que la distribution de champ magnétique soit la même aux instants $+ O$ et $T_c - O$. Alors, la variation totale du flux ψ_1 entre ces deux instants sera due seulement à la variation des courants i_1 et i_2 entre ces deux instants. Alors

$$(40) \qquad \frac{1}{T_c} \int_{+0}^{T_c - 0} \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + \frac{\partial \psi_1}{\partial i_c} \frac{d i_c}{d t} \right) d t =$$

$$= \frac{1}{T_c} \int_{+0}^{T_c - 0} \left(i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + i_c \frac{\partial M_{1c}}{\partial \Theta_2} \dot{\Theta}_2 + M_{1c} \frac{d i_c}{d t} \right) d t = 0$$

Si on prend la valeur moyenne de (38-a) sur un intervalle de commutation et on introduit la relation (40), on obtient :

$$(41) \qquad \frac{1}{T_c} \int_{+0}^{T_c - 0} \left(L_1 \frac{d i_1}{d t} + M_{12} \frac{d i_2}{d t} + R_1 i_1 \right) d t = \frac{1}{T_c} \int_{+0}^{T_c - 0} v_1 \, dt$$

Si le nombre de sections de la machine est assez élevé pour que le temps de commutation T_c puisse être considéré comme infinitésimal, l'équation (41) peut s'écrire

$$(42) \qquad L_1 \frac{d i_1}{d t} + M_{12} \frac{d i_2}{d t} + R_1 i_1 = v_1$$

C'est sous cette forme qu'on présente d'habitude l'équation de l'inducteur.

Analysons maintenant l'équation (38-b).

Dans une machine normale les coefficients d'induction L_1, M_{12}, L_2 peuvent être considérés comme étant du même ordre de grandeur, alors que L_c, M_{1c}, M_{2c} sont d'un ordre très inférieur.

En fait, si N représente le nombre de sections de l'induit M_{1c} et M_{2c} sont en $\frac{1}{N}$ par rapport à L_2 et L_1 ; quant à L_c il est en $\frac{1}{N^2}$ par rapport à L_2.

Ce fait nous permet de négliger l'énergie propre de commutation $T_{cc} = \frac{1}{2} L_c i_c^2$ en ce qui concerne l'établissement des équations de mouvement, lorsque N est élevé.

L'énergie mutuelle $T_{1c} + T_{2c} = M_{1c} i_1 i_c + M_{2c} i_2 i_c$ peut être négligée en ce qui concerne la définition de l'état énergétique de la machine ; mais elle ne peut pas être négligée dans l'établissement des équations de mouvement, parce qu'alors l'énergie intervient par ses dérivées.

Maintenant, si on fait pour l'énergie magnétique totale T_E aux instants $+ O$ et $T_c - O$ les mêmes remarques que pour ψ_1, on peut écrire

$$(43) \qquad \frac{1}{T_c}\int_{+0}^{T_c-0}\left(\frac{\partial T_E}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + \frac{\partial T_E}{\partial i_c}\frac{di_c}{dt}\right)dt = \frac{1}{T_c}\int_{+0}^{T_c-0}\left(i_1 i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + i_1 M_{1c} + \frac{di_c}{dt} + \right.$$

$$\left. + i_1 i_c \frac{\partial M_{1c}}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + i_2 M_{2c}\frac{di_c}{dt} + i_2 i_c \frac{\partial M_{2c}}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2\right)dt = 0$$

Si l'on introduit l'équation (40) dans (43), on obtient :

$$(44) \qquad \frac{1}{T_c}\int_{+0}^{T_c-0}\left(i_2 \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + M_{2c}\frac{di_c}{dt} + i_c \frac{\partial M_{2c}}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2\right)dt = \frac{1}{T_c}\int_{+0}^{T_c-0}\frac{1}{2} i_2 \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2\, dt$$

Ce résultat peut être combiné avec l'éq. (38-b) pour obtenir l'équation d'induit :

$$(45) \qquad \frac{1}{T_c}\int_{+0}^{T_c-0}\left(L_2\frac{di_2}{dt} + M_{12}\frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} i_2 \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + i_1 \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + R_2 i_2\right)dt =$$

$$= \frac{1}{T_c}\int_{+0}^{T_c-0} v_2\, dt$$

Si le nombre de sections est très élevé, on peut écrire pour l'équation d'induit

$$(46) \qquad L_2\frac{di_2}{dt} + M_{12}\frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} i_2 \frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + i_1 \frac{dM_{12}}{\partial \Theta_2}\dot{\Theta}_2 + R_2 i_2 = v_2$$

Enfin, l'équation mécanique peut être obtenue directement à partir de (38-c) ; il suffit de remarquer que les termes associés aux sections en commutation sont d'ordre $\frac{1}{N}$ par rapport aux autres et peuvent être négligés :

$$(47) \qquad \frac{1}{T_c}\int_{+0}^{T_c-0}\left(J_2\frac{d^2\Theta_2}{dt} + \alpha_2\frac{d\Theta_2}{dt} \quad \frac{1}{2}\frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2} i_2^2 - \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} i_1 i_2\right)dt = \frac{1}{T_c}\int_{+0}^{T_c-0}\Gamma_2\, dt$$

Pour un nombre assez élevé de sections, l'équation (47) s'écrira :

$$(48) \qquad J_2\frac{d^2\Theta_2}{dt^2} + \alpha_2\frac{d\Theta_2}{dt_2} - \frac{1}{2}\frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2} i_2^2 - \frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} i_1 i_2 = \Gamma_2$$

Les résultats obtenus montrent que les équations des machines à commutation sont essentiellement des équations de valeurs moyennes prises sur l'intervalle de commutation.

Pourtant, la méthode utilisée pour les obtenir n'est pas parfaite d'un point de vue dynamique.

En fait, l'état énergétique de la machine peut être entièrement décrit par les variables et paramètres mesurés aux terminaux accessibles da l'inducteur et de l'induit. Malgré cela, pour déterminer les équations de mouvement on a eu besoin de considérer une variable intérieure i_c et l'énergie infitésimale qui lui est associée.

Ce procédé n'est pas dans l'esprit des méthodes de la Dynamique Analytique.

Il nous paraît intéressant de trouver une méthode qui puisse se passer des sections en commutation, l'analyse du fonctionnement étant faite seulement à partir des variables et paramètres mesurés aux terminaux accessibles.

Cette méthode ne doit pas s'attaquer aux valeurs instantanées comme la précédente, parce que là interviennent nécessairement les effets de commutation, mais directement aux valeurs moyennes.

Par la suite, on va établir un modèle équivalent à la machine réelle capable de représenter directement ce qui se passe en valeur moyenne dans cette machine, mais où n'existent pas les phénomènes associés à la commutation. C'est ce modèle équivalent qu'on utilisera ensuite dans l'établissement des équations du mouvement des machines à commutation.

1 — 2 — *Modèle équivalent des machines à commutation*

Considérons une machine à collecteur, bipolaire, dont l'induit est bobiné avec un enroulement en tambour, diamétral. La commutation sera supposé du type «simple».

Soit $2N = 2N_0$ le nombre de «sections» de l'induit. L'angle entre deux «sections» consécutives sera alors $\frac{\pi}{N_0}$ (Fig. 1). Soit $\alpha = \alpha_0$ l'angle couvert par conducteur (Fig. 1).

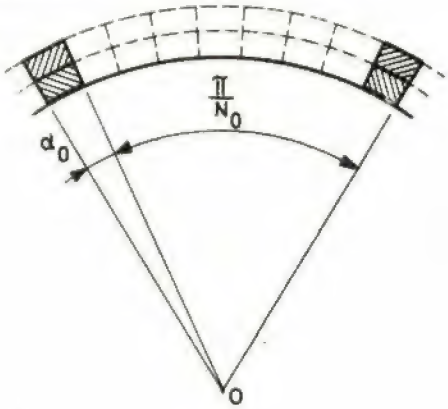


Fig. 1

A partir de la Fig. 1, on imagine facilement un enroulement multiple d'ordre $m = m_0 = \frac{\pi}{\alpha_0 N_0}$ (supposé entier) lequel couvrira l'induit d'une façon continue comme on l'a représenté en pointillé sur la fig. 1. Le nombre de lames au collecteur sera naturellement multiplié par m_0.

On fera maintenant

$$N = N_0$$
$$m \longrightarrow \infty$$
$$\alpha \longrightarrow 0$$

On imagine ainsi un induit avec un nombre infini de voies en parallèle et un nombre infini de lames au colecteur.

On va substituer aux balais originaux deux balais avec la forme représentée sur la fig. 2.

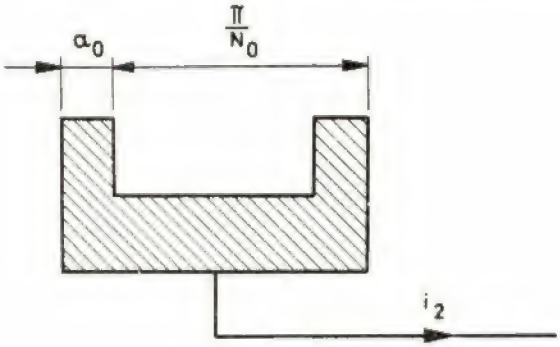


Fig. 2

Ce système équivalent peut reproduire tous les phénomènes instantanés de la machine réelle si on atribue aux balais de la fig. 2 un mouvement oscillant comme il est représenté sur la fig. 3 où ρ_2 désigne la coordonnée de position des balais.

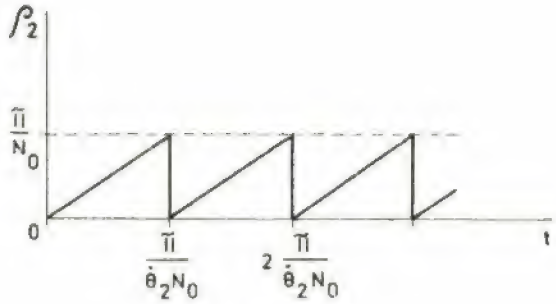


Fig. 3

Si, par contre, on fixe les balais dans une position moyenne, le système équivalent représente ce qui se passe en valeur moyenne dans la machine réelle et cela d'autant plus parfaitement que N_0 est plus grand.

Entre les extrêmités A et B des balais (fig. 2) circule un courant de court-circuit, lequel, dans le cas des balais oscillants, est équivalent au courant de commutation de la machine réelle.

Lorsqu'on fixe les balais, il y a toujours un courant de court-circuit, mais qui est maintenant constant. Si le nombre de sections N_0 est assez élevé, ce courant pourra être négligé dans l'analyse du système.

Le modèle equivalent établi est applicable à des machines avec des balais tournants, si on attribue aux balais de la Fig. 2 la vitesse de rotation convenable.

Enfin, le modèle est aussi applicable à des machines avec commutation électronique.

Le modèle équivalent établi n'a rien à voir avec la «machine parfaite» de la théorie classique des machines électriques. La «machine parfaite» est obtenue en faisant $N_0 \longrightarrow \infty$. Elle se comporte instantanément comme la machine réelle et a déjà été utilisée dans ce travail pour établir les équations (42), (46) et (48).

Il y a une autre différence entre le modèle équivalent et la «machine parfaite» : le passage d'une machine réelle à une machine parfaite implique un changement de valeur des paramètres et variables, alors que le passage au modèle equivalent conserve la valeur moyenne de ces paramètres et variables.

Le comportement instantané du système équivalent est analogue à celui de la roue de Barlow (Fig. 4) si on admet que le rotor de celle-ci est constitué par un nombre infini de rayons isolés, de façon que le tube de courant OA ait une forme bien définie.

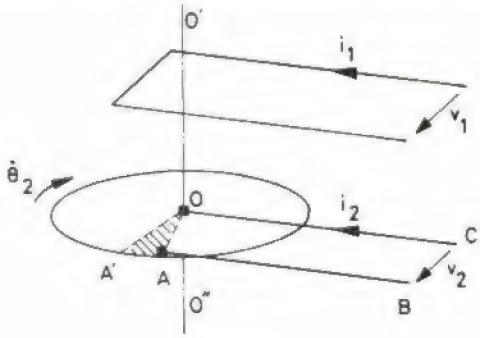


Fig. 4

Il y a cependant une différence à signaler entre le système équivalent et la roue de Barlow : dans celle-ci les conducteurs extérieurs jouent un rôle qui est quantitativement comparable à celui des conducteurs actifs OA alors que dans le modèle équivalent d'une machine à commutation le rôle joué par les conducteurs extérieurs est négligeable. Pourtant cette différence est essentiellement quantitative et non qualitative : l'analyse des deux systèmes se conduit de façon analogue.

On peut retrouver sur le modèle équivalent ou sur la roue de Barlow les mêmes erreurs que dans les équations (36) si on fait pour leur étude le raisonnement incorrect suivant : admetre que pour calculer la f. e. m. dans l'induit on doit imaginer les «tubes de courant» (OA sur la fig. 4) instantatément liés à la matière (OA' sur fig. 4) et attribuer ainsi une valeur non nulle aux dérivées $\frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2}$ et $\frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2}$.

Ce raisonnement revient à traiter le circuit O A B C O comme un circuit instantannément déformable. Calculons p. e. la f. e. m. de self induction du circuit O A B C O. D'après des résultats connus pour les circuits déformables cette f. e. m. peut êutre écrite [15]

$$e_{22} = -\frac{1}{2} i_2 \frac{dL_2}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{2} i_2 \frac{dL_2}{dt} \tag{49}$$

Le premier terme est associable au flux balayé. Le second terme est associé à la variation d'intensité de courant. Enfin, le troisième terme, d'ailleurs numériquement égal au premier, est associé à la variation d'induction magnétique due au déplacement du courant.

C'est précisément ce dernier type de termes qui est à l'origine des difficultés. Dans la machine à commutation il est compensé par les effets du courant de commutation mais ce ne sera plus le cas dans les systèmes du type roue de Barlow.

On verra par la suite que dans ces systèmes sauf en ce qui concerne les variations de perméabilité magnétique associées au mouvement du rotor on doit faire $\frac{\partial L_2}{\partial \Theta_2} = 0$, $\frac{\partial M_{12}}{\partial \Theta_2} = 0$ et introduire diffèremment la f. e. m. motionelle dans l'induit. On prend ainsi le point de vue de Carvallo [2] à propos de la roue de Barlow.

2 — *Déducion des équations de mouvement à partir du principe de conservation de l'ènergie*

Après avoir établi le modèle équivalent des machines à commutation et montré son analogie avec la roue de Barlow, on va étudier les équations de mouvement de cette classe de systèmes.

Pour un observateur en repos dans un référenciel l'équation de Maxwell

$$\text{rot}\ \overline{E}_o^i = -\frac{\partial \overline{B}}{\partial t} \tag{50}$$

est indépendant du mouvement du milieu matériel en chaque point. Pourtant, un observateur en mouvement transportant une charge q avec vitesse $\overline{\Theta}$ (petite par rapport à celle de la lumière) mesure une force q $(\dot{\overline{\Theta}} \times \overline{B})$ en plus de la force $q\overline{E}_o^i$ due au champ électrique $\overline{E}_o^i$ qui peut exister. Alors, le champ électrique mesuré par l'observateur en mouvement est:

$$\overline{E}^i = \overline{E}_o^i + (\dot{\overline{\Theta}} \times \overline{B}) \tag{51}$$

L'équation (50) prendra la forme

$$\text{rot}\ \overline{E}^i = -\frac{\partial \overline{B}}{\partial t} - \text{rot}\ (\overline{B} \times \dot{\overline{\Theta}}) \tag{52}$$

$\overline{E}^i$ représentant le champ mesuré dans le milieu en mouvement [16].

Le théorème de Stokes nous permet d'utiliser l'éq. (52) pour calculer la f. e. m. induite dans un circuit *a*:

$$e_a = \oint (\overline{E}^i \,.\, \overline{ds}_a) = -\iint \left(\left[\frac{\partial \overline{B}}{\partial t} + \text{rot}\ (\overline{B} \times \dot{\overline{\Theta}}) \right] . \, \overline{dS}_a \right) \tag{53}$$

Les intégrales de (53) sont prises sur un contour s_a et une surface S_a supposés liés à la matière dans son mouvement.

Considérons maintenant un circuit parcouru par un courant linéique i_a (Fig. 5).

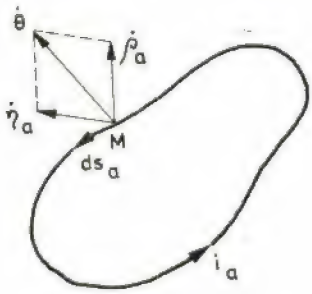


Fig. 5

Prenons en un point M du circuit *a* un élément vectoriel $\overline{ds_a}$ dans les direction et sens du courant et lié à celui-ci. Soient em M:

$\dot{\overline{\Theta}}$ — vitesse du milieu conducteur

$\dot{\overline{\rho}}_a$ — vitesse de l'élément ds_a

$\dot{\overline{n}}_a = \dot{\overline{\Theta}}_a - \dot{\overline{\rho}}_a$ — vitesse de glissement du milieu conducteur par rapport à l'élément ds_a.

L'existence d'un glissement entre milieu conducteur et courant est réalisable dans les systèmes type roue de Barlow et notamment dans le modèle équivalent des machines à commutation.

Si on applique la loi d'induction (53) à ce circuit on peut écrire:

$$e_a = -\iint \left(\left[\frac{\partial \overline{B}}{\partial t} + \text{rot}\left(\overline{B} \times \dot{\overline{\rho}}_a\right) + \text{rot}\left(\overline{B} \times \dot{\overline{n}}_a\right) \right] . \, d\overline{S}_a \right) \tag{54}$$

Dans cette éq. (54) le terme en $\frac{\partial \overline{B}}{\partial t}$ représente la variaton de flux à travers le circuit *a* qui est due aux variations temporelles d'induction magnétique en chaque point de l'espace: cette variation de $\overline{B}$ est associée aux variations d'intensité des courants, au mouvement des courants (le courant i_a y compris) et aux variations de reluctance magnétique associées au mouvent de la matière avec la vitesse $\dot{\Theta}$.

Les deux derniers termes de l'intégrale (54) sont associés au flux balayé avec la vitesse $\dot{\Theta}$. Pourtant il y a entre les deux termes des différences qu'on verra par la suite.

Le terme en $\dot{\bar{\rho}}_a$ est associé à une variation réelle du flux à travers le circuit a et peut être combiné avec le terme en $\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$ pour écrire:

$$\iint \left(\left[\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \mathrm{rot} \left(\bar{B} \times \dot{\bar{\rho}}_a \right) \right] \cdot d\bar{S}_a \right) = \frac{d\psi_a}{dt} \tag{55}$$

Cette f. e. m. $\left(- \frac{d\psi_a}{dt} \right)$ peut être calculé comme une force d'inertie généralisée et c'est elle qu'on a trouvée dans l'étude des circuits filiformes à connexions fixes.

La théorie des circuits filiformes établit que le travail de la f. e. m. $- \iint \left(\mathrm{rot} \left(\bar{B} \times \dot{\bar{\rho}}_a \right) . d\bar{S}_a \right)$ est égal au travail des forces électrodynamiques agissant sur le circuit a [15].

Si on combine ce résultat avec ceux obtenus dans l'étude des machines a connexions fixes (eq. 17), on peut écrire pour un circuit filiforme a caractérisable par les coordonnées géomètriques q_{au}:

$$i_a . \iint \left(\mathrm{rot} \left(\bar{B} \times \dot{\bar{\rho}}_a \right) . d\bar{S}_a \right) = \sum_u \dot{q}_{au} . \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} \tag{56}$$

Alors

$$\iint \left(\mathrm{rot} \left(\bar{B} \times \dot{\bar{\rho}}_a \right) . d\bar{S}_a \right) = \sum_u \frac{\dot{q}_{au}}{i_a} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} \tag{57}$$

Les dérivées $\frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}}$ tendent vers 0 au moins avec i_a.

L'expression analytique (57) restera valable dans le cas des circuits avec glissement qu'on étudie maintenant, quel que soit le rôle des coordonnées q_{au}.

Le dernier terme de l'équation (54) est associé au flux balayé avec la vitesse $\bar{v}_a$. Contrairement au terme en $\dot{\bar{\rho}}_a$, il n'est pas associé aux variations réelles de flux à travers le circuit a. Alors, on ne pourra pas le calculer comme une force d'inertie généralisée.

On verra plus tard quelle est la nature dynamique de ce terme. Pour le moment, on va lui trouver une expression analytique commode.

Ceci est possible dans le cas des machines électriques.

La configuration du système mécanique est alors caractérisable par des coordonnées géomètriques q_u, et le système de courants par un certain nombre de coordonnées q_{au} de même nature que les q_u. Une coordennée q_{au} sera définie lorsque le circuit a s'établit dans le système conducteur auquel se refère la coordonnée q_u et son sens positif sera celui de la coordonnée q_u.

Dans le modèle équivalent d'une machine à collecteur une coordonnée q_u sera, p. e. l'angle de position du rotor et une coordonnée q_{au} sera, p. e. l'angle de position des balais du circuit a du rotor.

Considerons encore le système de la fig. 4. Si les circuits peuvent tourner autour de l'axe O' OO'' on considere 3 coordonnées q_u (qui seront des angles) : une coordonnée q_4 définissant la position des conducteurs de l'inducteur, une coordonnée q_5 définissant la position de la roue et une coordonnée q_6 définissant la position des conducteurs extérieurs de l'induit.

Il y a encore 3 coordonnées q_{au} à considérer .

Une coordonnée q_{14} qui définit la position du circuit 1 et les coordonnées q_{25} et q_{26} qui définissent la configuration du circuit 2.

Si on ajoutait une nouvelle paire de balais à l'induit, il faudrait considérer de nouvelles coordonnées q_7, q_{35} et q_{37}.

Les coordonnées q_{au} sont en relation avec les coordonnées q_v pendant le mouvement réel:

$$q_{au} = q_{au} (q_v) \tag{58}$$

Dans un circuit filiforme, on aura $q_{au} = q_u$. Dans un circuit avec contacts glissants on aura $q_{au} = q_{au}(q_v)$ avec $v \neq u$.

P. e. dans le système de la fig. 4 on aura $q_{14} = q_1$, $q_{26} = q_6$ pour les conducteurs filiformes et $q_{45} = -q_6 + C'$ pour le circuit dans la roue.

Dans le modèle équivalent d'une machine à commutation les conducteurs extérieurs de l'induit ne participent pas à la conversion d'énergie. Les coordonnées respectives, comme q_6 dans la roue de Barlow de la fig. 4, peuvent être négligées. Elles ne serviraient qu'à définir la position des balais, et cet effet peut être traduit en écrivant que les q_{au} sont des fonctions quelconques du temps

$$q_{au} = q_{au}(t) \tag{59}$$

Alors dans le cas général, les relations (58) auront la forme

$$q_{au} = q_{au}(q_v, t) \qquad \begin{array}{l} a = 1 \ldots\ldots\ldots p \\ u, v = p+1 \ldots\ldots n \end{array} \tag{60}$$

Les remarques précédentes nous permettent maintenant de trouver une expression analytique commode pour le dernier terme de l'intégrale (54). En fait, à chaque paire de coordonnées q_u, q_{au} s'associent des vitesses $\dot{\rho}_a$, $\dot{\Theta}$, $\dot{\eta}_a$ paralles.

Alors, une compaisou directe avec, l'éq. (57) conduit à écrire

$$\iint (\mathrm{rot}\,(\overline{B} \times \dot{\overline{\eta}}_a).\, d\,\overline{S}_a) = \sum_u \frac{\dot{\eta}_{au}}{i_a} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} = \sum_u \frac{\dot{q}_u - \dot{q}_{au}}{i_a} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} \tag{61}$$

en ayant introduit ici les variables auxiliaires

$$\eta_{au} = q_u - q_{au} \tag{62}$$

qui représentent les glissements.

Si on combine les équations (55) et (61), on peut alors écrire les équations électriques du système

$$v_a - R_a i_a = \frac{d\,\psi_a}{d\,t} + \sum_u \frac{\dot{q}_u - \dot{q}_{au}}{i_a} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} \tag{63}$$

Les équations (63) constituent une généralisation aux systèmes de machines avec contacts glissants, des équations (3).

Les équations mécaniques seront obtenues, maintenant, à partir du principe de conservation de l'énergie.

Considérons d'abord l'expression de l'énergie magnétique T_E. L'énergie magnétique sera fonction des courants i_a et des coordonnées q_{au} qui définissent la configuration du système des courants. Elle sera encore fonction des coordonnées q_u du système mécanique s'il y a des matériaux ferromagnétiques et des variations de reluctance magnétique associées aux variations des coordonnées q_u. Alors, on écrira

$$T_E = \int_{0 \ldots\ldots 0}^{\psi_1 \ldots\ldots \psi_p} \sum_{a=1}^{p} i_a\,(\psi_1 \ldots\ldots \psi_p;\; q_{p+1} \ldots\ldots q_n;\; q_{1,p+2}\; {}_{p+1} \ldots\ldots q_{p,n})\, d\,\psi_a \tag{64}$$

l'intégration (64) étant réalisée avec les coordonnées géomètriques constantes.

Considérons maintenant un déplacement infinitésimal arbitraire dq_u.

Pour que ce déplacement soit compatible avec les liaisons électromécaniques du système il faut respecter les conditions de non-glissement dans les circuits filiformes. Alors, le déplacement dq_u impliquera un certain nombre de déplacements dq_{bu} concernant les tronçons filiformes des circuits :

$$dq_{bu} = dq_u \qquad (b = 1 \ldots\ldots\ldots k) \tag{65}$$

On verra que les conditions (65) constituent un cas particulier de certaines conditions plus générales à trouver par la suite.

Le principe de conservation de l'énergie nous permet d'écrire:

$$(66) \qquad \sum_{a=1}^{p} (v_a - R_a\, i_a)\, i_a\, dt + (\Gamma_u - \alpha_u\, \dot{q}_u)\, dq_u = d\,T_E + d\,T_M$$

Si on introduit l'éq. (63) dans ce résultat on obtient

$$(67) \qquad \sum_{a=1}^{p} \left[i_a\, d\psi_a + (dq_u - dq_{au})\, \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} \right] + (\Gamma_u - \alpha_u\, \dot{q}_u)\, dq_u = d\,T_E + d\,T_M$$

Si on désigne par l'indice $b = 1 \ldots\ldots k$ les coordonnées concernant les tronçons filiformes, auxquelles sont applicables les relations (65) et par $c = k + 1 \ldots\ldots p$ les autres tronçons à contacts glissants pour lesquels $dq_{cu} = 0$ on peut écrire (67) sous la forme:

$$(68) \qquad \sum_{a=1}^{p} i_a\, d\psi_a + \sum_{c=k+1}^{p} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{cu}}\, dq_u + (\Gamma_u - \alpha_u\, \dot{q}_u)\, dq_u = d\,T_E + d\,T_M$$

Si on développe l'éq. (68) comme on a fait pour l'éq. (5), on obtient

$$(69) \qquad (\Gamma_u - \alpha_u\, \dot{q}_u)\, dq_u = -\left(\frac{\partial T'_E}{\partial q_u} + \sum_{b=1}^{k} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{bu}} \right) dq_u - \sum_{c=k+1}^{p} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{cu}}\, dq_u + d\,T_M$$

ce qui nous permettra enfin, d'écrire l'équation mécanique

$$(70) \qquad \Gamma_u = \frac{d}{dt} \frac{\partial T_M}{\partial \dot{q}_u} - \frac{\partial T_M}{\partial q_u} - \frac{\partial T'_E}{\partial q_u} - \sum_{a=1}^{p} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} + \alpha_u\, \dot{q}_u$$

Le mouvement du système électromécanique est complètement décrit par les équations (60), (63) et (70) lesquelles sont applicables aussi bien aux systèmes avec contacts glissants qu'aux systèmes de conducteurs filiformes à contacts fixes déjà étudiés dans la partie B.

3 — *Déduction des équations de mouvement à partir du principe d'Hamilton*

On va maintenant interpréter les résultats précédents d'un point de vue dynamique et les retrouver ensuite à partir du principe d'Hamilton.

3 — 1 — *Forces de liaison électromécaniques*

Considérons le modèle équivalent de la machine à commutation analysée dans la section C — 1. Désignons par ρ_2 la coordonée de position des balais et par Θ_2 celle du rotor.

On va appliquer directement les équations de Lagrange (28) à ce modèle équivalent. On tient compte de $\frac{\partial L}{\partial \Theta_2} = \frac{\partial M}{\partial \Theta_2} = 0$ et de ce que la force appliquée selon la coordonnée ρ_2 est nulle. Les équations selon les coordonnées q_1, q_2, ρ_2, Θ_2 sont:

$$(71\text{-a}) \qquad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial i_1} + \frac{\partial F}{\partial i_1} = L_1 \frac{d\,i_1}{dt} + M_{12} \frac{d\,i_2}{d\,i} + R_1\, i_1 = v_1$$

$$(71\text{-b}) \qquad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial i_2} + \frac{\partial F}{\partial i_2} = L_2 \frac{d\,i_2}{dt} + M_{12} \frac{d\,i_1}{dt} + R_2\, i_2 = v_2$$

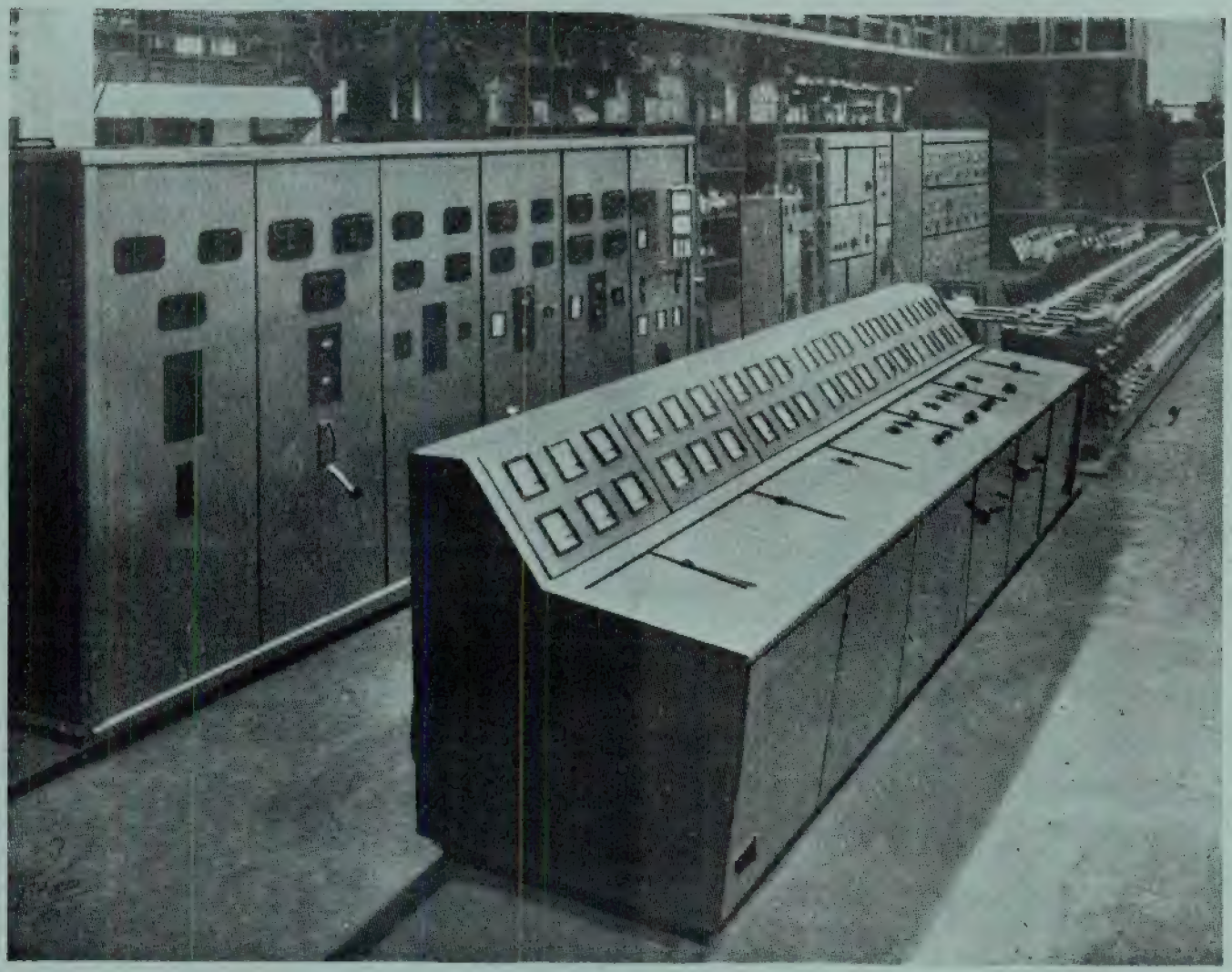
JAYME DA COSTA, L^DA

MECÂNICA E ELECTRICIDADE EM TODAS AS APLICAÇÕES

PORTO
Praça da Batalha, 12
Telef. 2 28 12 (PPC)

LISBOA
Rua dos Correeiros, 14
Telef. 32 70 35 (PPC)

LUANDA
Cx. Postal 5174
Telef. 4743



Material fabricado nas nossas oficinas, pronto para expedição

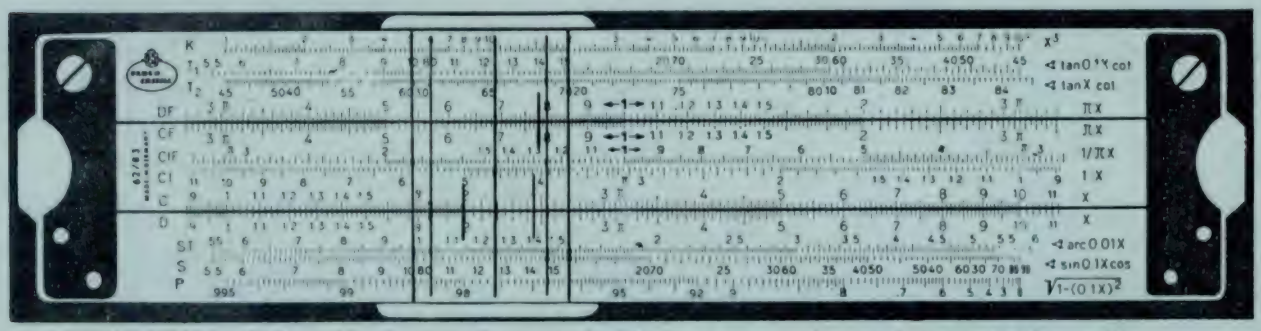
- Fabricação de aparelhagem eléctrica de alta e baixa tensão
- Equipamentos electromecânicos completos para centrais e fábricas
- Postos de transformação tipo monobloco
- Quadros blindados, capsulados e em armário
- Armaduras de iluminação de todos os tipos
- Contadores eléctricos e instrumentos de medida
- Telemedida e telecomando
- Instalações elevatórias de água
- Instalações de saneamento e esgotos
- Ferramentas de corte
- Motores Diesel industriais e marítimos
- Fogões eléctricos
- Frigoríficos
- Ventilação e condicionamento de ar
- Aparelhagem de Raios X e electromedicina

Uma Régua de Cálculo de Bolso (escala de 12,5 cms), na qual se podem fazer múltiplos cálculos com a exactidão de uma régua de 25 cms.

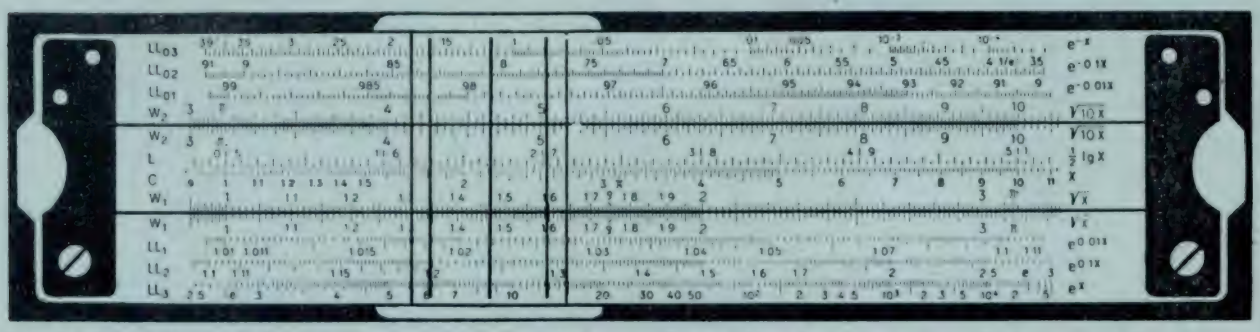
CASTELL-NOVO-BIPLEX 62/83

O mais moderno auxiliar para os seus estudos e para a sua profissão.

A novidade mais importante reside nas escalas de raízes W_1, W_1', W_2, W_2', que possibilitam uma exactidão de cálculo de 4 decimais, por ser interrompida a divisão em $\sqrt{10} = 3{,}16$ e repartida em dois pares de escalas.



Parte dianteira: Além da aprovada escala de T_2 para valores tangenciais e de ângulos maiores do que 45°, temos ainda as escalas CF e DF e a escala recíproca CIF, todas deslocadas por π.



Parte trazeira: Seis escalas exponenciais para o cálculo com expoentes positivos e negativos, e uma escala elementar C que trabalha em conjunto com as escalas exponenciais. Com referência às escalas de raízes, esta escala elementar C exerce as funções de escala de quadrados.

A matéria plástica Geroplast da qual é feita a régua de cálculo, mantem-se inalterável em todos os climas, incluindo o clima tropical até 70° centígrados, não é inflamavel, é elástico e à prova de quebra. Desta maneira, Geroplast concentra em si todas as boas qualidades de um material plástico para uma régua de cálculo de alta qualidade.

Além: A CASTELL-NOVO-BIPLEX 2/83
Uma régua de 25 cms com a exactidão de uma régua de 50 cms.

A. W. FABER-CASTELL · STEIN BEI NÜRNBERG · ALLEMANHA

(71-c) $$-\frac{\partial T}{\partial \rho_2} = -\frac{1}{2}\frac{\partial L_2}{\partial \rho_2} i_2^2 - \frac{\partial M_{12}}{\partial \rho_2} i_1 i_2 = 0$$

(71-d) $$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{\Theta}_2} + \frac{\partial F}{\partial \dot{\Theta}_2} = J_2 \frac{d^2 \Theta_2}{d t_2} + \alpha^2 \frac{d \Theta_2}{d t} = \Gamma_2$$

Exceptée l'équation électrique de l'inducteur (71-a) toutes ces équations sont incorrectes. Il leur manque justement les termes correspondants à la conversion électromécanique de l'énergie.

Pour trouver l'origine de ces erreurs, considérons le cas des circuits filiformes à contacts fixes auxquels les équations de Lagrange sont applicables. On peut utiliser à cet effet le circuit inducteur qui est précisément de ce type.

Soient Θ_1 et ρ_1 les coordonnées géomètriques du système inducteur. D'après les conditions (65) on aura pour tout déplacement virtuel

(72) $$\delta \rho_1 = \delta \Theta_1$$

Si on veut appliquer les équations de Lagrange aux coordonnées ρ_1 et Θ_1 il faut tenir compte de la condition (72). Si on utilise la méthode des multiplicateus de Lagrange [10], [13], [17] on obtient le système d'équations:

(73-a) $$-\frac{\partial T}{\partial \rho_1} + \lambda_1 = 0$$

(73-b) $$-\frac{\partial T}{\partial \Theta_1} - \lambda_1 = \Gamma_1$$

(73-c) $$\dot{\rho}_1 = \dot{\Theta}_1$$

Fig. 6

Ces résultats suggèrent une interprétation dynamique simple: si on imagine le «tube de courant» isolé dans l'espace, on doit considérer l'existence d'une force de liaison λ_1 entre ce tube et la matière conductrice (Fig. 6).

Le tube est maintenu en équilibre par la «force de liaison» λ_1, et par la «force d'inertie» $\frac{\partial T}{\partial \rho_1}$. D'autre part, la «force de liaison» λ_1, est transmise à la matière conductrice et c'est elle qu'on va mesurer sur le système mécanique.

Dans le cas des circuits filiformes à contacts fixes la force de liaison ne travaille pas et on peut utiliser (73-c) pour éliminer la coordonnée ρ_1. C'est ce qu'on a fait dans le paragraphe B: le système d'équations (73) est alors remplacé par une seule équation,

(74) $$-\frac{\partial T}{\partial \Theta_1} = \Gamma_1$$

qu'on pourrait obtenir directement à partir de (28).

La situation change dans les circuits à contacts à glissants.

L'existence d'un mouvement relatif entre les courants et le système mécanique entraîne que les forces de liaison mécaniques travaillent avec la vitesse de glissement.

A ce travail des forces de liaison mécaniques correspond l'introduction selon le circuit correspondant d'une «f. e. m. de liaison»: c'est la f. e. m. suplémentaire des éqs. (63).

Or c'est justement la considération des liaisons électromécaniques internes qui nous a manqué

dans l'établissement das équations (28). On va voir par la suite comment on peut introduire les «forces de liaison» dans l'établissement des équations de mouvement.

3 — 2 — *Equations de mouvement*

Quand on a appliqué le principe d'Hamilton dans le paragraphe B-2, éq. (23), on a admis implicitement que le travail des forces de liaison intérieures du système était nul pour toutes variatons δ. C'est bien le cas dans les systêmes de conducteurs filiformes à connexions fixes, raison pour laquelle les équations obtenues sont correctes.

Ce n'est plus le cas dans les systèmes à contacts glissants. Pour que le travail des forces de liaison intèrieures soit nul, il faut choisir convenablemente les variations δ. Ce sera seulement à ces variations que le principe d'Hamilton est applicable.

Soient δq_a les variations des coordonnées électriques q_a. D'après l'éq. (63) le travail des «f. e. m. de liaison» associé à ces variations δq_a est

$$\delta \tau_e = \sum_{a=1}^{p} \sum_{u=p+1}^{n} \frac{\dot{q}_u - \dot{q}_{au}}{i_a} \cdot \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} \cdot \delta q_a \tag{75}$$

Si on désigne par δq_u et δq_{au} les déplacements virtuels selon les coordonnées géomètriques, le travail mécanique des forces de liaison est

$$\delta \tau_m = - \sum_{u=p+1}^{n} \sum_{a=1}^{p} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} (\delta q_u - \delta q_{au}) \tag{76}$$

Pour que le travail virtuel total des forces de liaison soit nul, il faut, alors, que

$$\delta \tau_e + \delta \tau_m = \sum_{a=1}^{p} \sum_{u=p+1}^{n} \left[(\dot{q}_u - \dot{q}_{au}) \, \delta q_a - i_a \, \delta q_u + i_a \delta q_{au} \right] \frac{1}{i_a} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}} = 0 \tag{77}$$

L'existence d'un travail des forces de liaison constitue une propriété locale résultante des contacts glissants. Elle concerne chaque circuit en soit même, indépendamment du fait que les autres circuits soient à connexions fixes ou variables. Alors, la condition (77) doit être équivalente aux relations

$$(\dot{q}_u - \dot{q}_{au}) \, \delta q_a - i_a \, \delta q_u + i_a \, \delta q_{au} = 0 \qquad \begin{array}{l} a = 1 \ldots\ldots p \\ u = p + 1 \ldots n \end{array} \tag{78}$$

Les conditions de travail nul contiennent comme un cas particulier les conditions de liaison (65) concernant les tronçons filiformes des circuits.

Reprenons maintenant l'équation (27)

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum_{\gamma} \left(\frac{\partial T'}{\partial q_\gamma} - \frac{d}{dt} \frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_\gamma} + Q_\gamma - \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma} \right) \delta q_\gamma \, dt = 0 \tag{79}$$

l'indice γ désignant une des coordonnées q_a, q_u ou q_{au}.

Nous ne pouvons plus déduire de (79) les équations (28) parce que maintenant, les δq_γ ne sont pas arbitraires. L'équation (79) ne sera valable que pour les déplacements δq_γ qui satisfont aux conditions (78). Ecrivons ces conditions sous la forme

$$\sum_{\gamma} A_{\beta\gamma} \, \delta q_\gamma = 0 \qquad \begin{array}{l} \gamma = 1 \ldots p; \; p + 1 \ldots n; \; n + 1 \ldots\ldots n + p.r \\ \beta = 1 \ldots p.r \end{array} \tag{80}$$

Pour obtenir les équations de mouvement on utilisera les multiplicateurs de Lagrange λ_β.
Si on multiplie les β relations (80) par les λ_β et on additionne en β, on peut écrire:

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum_{\beta,\gamma} \lambda_\beta A_{\beta\gamma} \, \delta q_\gamma \, dt = 0 \tag{81}$$

Si on additionne cette relation à (79) on obtient:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt \sum_\gamma \left(\frac{\partial T'}{\partial q_\gamma} - \frac{d}{dt} \frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_\gamma} + Q_\gamma - \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma} + \sum_\beta \lambda_\beta A_{\beta\gamma} \right) \delta q_\gamma = 0 \tag{82}$$

Le mouvement du système sera maintenant déterminé par les équations

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_\gamma} - \frac{\partial T'}{\partial q_\gamma} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_\gamma} = Q_\gamma + \sum_\gamma \lambda_\beta A_{\beta\gamma} \tag{83}$$

auxquelles il faut ajouter les relations (60)

$$q_{au} = q_{au} (q_v, t) \tag{84}$$

qui définissent, soit la position des balais dans les circuits à contacts glissants, soit la condition de non glissement dans les circuits à connexions fixes.

La méthode d' étude utilisée diffère de celle qu'on utilise d'habitude dans l'étude des systèmes dynamiques à liaisons de contact linéaires non-holonomes. Par contre elle est analogue à celle utilisée par Beghin [18] dans l'étude des liaisons d'asservissement, si on identifie les conditions (84) avec les «relations d'asservissement».

On va vérifier que les équations (83) sont équivalentes aux équations (63) et (70 . Utilisons les équations (83) relatives aux coordonnées q_{au}, pour définir les $\lambda_{au} = \lambda_\beta$.

On obtient

$$i_a \lambda_{au} = - \frac{\partial T'}{\partial q_{au}} \qquad \begin{array}{l} a = 1 \quad \ldots\ldots p \\ u = p+1 \ldots\ldots n \end{array} \tag{85}$$

Si on introduit les λ_{au} ainsi définis dans les équations de mouvement selon les coordonnées q_a et q_u on obtient

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_a} - \frac{\partial T'}{\partial q_a} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_a} = \frac{d \psi_a}{dt} + R_a i_a = v_a - \sum_{u=p+1}^{n} \frac{\dot{q}_u - \dot{q}_{au}}{i_a} \frac{\partial T'}{\partial q_{au}} \tag{86}$$

qui coïncide avec (63) parce que $\dfrac{\partial T_M}{\partial q_{au}} = 0$.

Pour les équations mécaniques on obtient

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T'}{\partial \dot{q}_u} - \frac{\partial T'}{\partial q_u} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_u} = \frac{d}{dt} \frac{\partial T_M}{\partial \dot{q}_u} - \frac{\partial T_M}{\partial q_u} - \frac{\partial T'_E}{\partial q_u} + \alpha_u \dot{q}_u = \tag{87}$$

$$= \Gamma_u + \sum_{a=1}^{p} \frac{\partial T'_E}{\partial q_{au}}$$

qui coïncident avec (70).

Considérons maintenant le cas des systèmes linéaires et écrivons les équations (83) sons une forme équivalente aux équations (35).

Pour cela on introduit un système (j) de quasi-coordonnées défini à partir du système (γ) des coordonnées q_γ par les transformations :

88
$$\overset{(j)}{\begin{vmatrix} dq_a \\ dq_u \\ (dq)_x \end{vmatrix}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \dot{q}_u - \dot{q}_{au} & -i_a^{-1} & i_a \end{vmatrix} \cdot \overset{(\gamma)}{\begin{vmatrix} dq_a \\ dq_u \\ dq_{au} \end{vmatrix}} \qquad \begin{array}{l} a = 1 \ldots\ldots p \\ u = p+1 \ldots\ldots n \\ x = n+1 \ldots\ldots n+p.r \end{array}$$

Les conditions de travail nul (78) sont maintenant traduites par les conditions

(89) $$(\delta q)_x = 0 \qquad x = n+1 \ldots\ldots\ldots n+p.r$$

Ces conditions sont identiquement satisfaites sur toute trajectoire réelle du système.

Les conditions (89) assurant le travail nul des forces de liaison intérieures, les variations δq_a et δq_u restent arbitraires ; cela veut dire que les forces de liaison selon les coordonnées q_a et q_u du système (j) de quasi-coordonnées sont nulles [19].

En plus, la coénergie cinétique généralisée T' n'est pas fonction des vitesses $\dot{q}_{au}$.

Ces résultats nous permettent d'utiliser directement les équations de Bolzmann-Hamel [13] [19], [20], pour obtenir les équations de mouvement selon les coordonnées q_a et q_u.

Les équations se réduiront ici à

(90) $$\frac{d}{dt}\frac{\partial T'}{\partial q_j} - \frac{\partial T'}{(\partial q)_j} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_j} + = Q_j \qquad j = 1 \ldots\ldots\ldots n$$

Les termes $\dfrac{\partial T'}{(\partial q)_j}$ ont l'expression

(91) $$\frac{\partial T'}{(\partial q)_j} = \sum_\gamma C_{j\gamma} \frac{\partial T'}{\partial q_\gamma}$$

les coefficients $C_{j\gamma}$ étant tirés de la transformation inverse de (88) qu'on suppose exister pour l'effet ($i_a \neq 0$) :

(92) $$\overset{(\gamma)}{\begin{vmatrix} dq_a \\ dq_u \\ dq_{au} \end{vmatrix}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \dfrac{\dot{q}_{au} - \dot{q}_u}{i_a} & 1 & \dfrac{1}{i_a} \end{vmatrix} \cdot \overset{(j)}{\begin{vmatrix} dq_a \\ dq_u \\ (dq)_x \end{vmatrix}}$$

Une fois que $\dfrac{\partial T'}{\partial q_{au}}$ tend vers zéro au moins avec i_a, les termes $\dfrac{\partial T'}{(\partial q)_j}$ restent finis même si $i_a \longrightarrow o$. Alors les équations (90) sont toujour : applicables.

Ecrites sous une forme équivalente à (35) elles deviendront :

(93) $$\sum_k a_{jk} \ddot{q}_k + \sum_{l,k} [l\,k, j]\, \dot{q}_l\, \dot{q}_k + \sum_k K_{jk}\, \dot{q}_k = Q_j$$

$$j, k, l = 1 \ldots\ldots\ldots n$$

Le symbole de Christoffel a maintenant la forme plus générale

$$\left[l\, k, j \right] = \frac{1}{2} \left(\partial_l\, a_{jk} + \partial_j\, a_{kl} - \partial_k\, a_{lj} \right) \tag{94}$$

les ∂_j étant définis, pour $i_a \neq 0$, par

$$\partial_j = \sum_{\gamma} C_{j\gamma} \frac{\partial}{\partial q_\gamma} \qquad \begin{array}{l} j = 1 \ldots\ldots\ldots n \\ \gamma = 1 \ldots\ldots\ldots n, n+1 \ldots n+p\ r \end{array} \tag{95}$$

Les équations (93) augmentées des équations (60 constituent une généralisation des équations (35) obtenues dans la section B, et coïncideront avec elles lorsque tous les circuits sont filiformes à connexions fixes.

D — EXEMPLE D'APPLICATION

On va considérer l'application des résultats antérieurs à la roue de Barlow de la Fig. 4.

On utilisera les notations définies dans la section C: q_1 et q_2 désignent les variables électriques de l'inducteur et induit, q_4, q_5 et q_6 les variables mécaniques.

L'énergie cinétique généralisée est:

$$T = \frac{1}{2} J_4\, \dot{q}_4^2 + \frac{1}{2} J_5\, \dot{q}_5^2 + \frac{1}{2} J_6\, \dot{q}_6^2 + \frac{1}{2} L_1\, i_1^2 + M_{12}\, i_1\, i_2 + \frac{1}{2} L_2\, i_2^2$$

ou J désigne les moments d'inertie et L, M les coefficients d'induction.

Les coefficients d'induction sont fonction des coordonnées q_{25}, q_{26}, q_{14}

$$L_2\, (q_{25}, q_{26}) \quad ; \quad M_{12}\, (q_{25}, q_{26}, q_{14})$$

mais pas fonction des coordonnées q_u si on admet qu'il n'y a pas de matériaux ferromagnétiques dans le système de la Fig. 4.

La fonction de dissipation sera

$$F = \frac{1}{2} \alpha_4\, \dot{q}_4^2 + \frac{1}{2} \sigma_5\, \dot{q}_5^2 + \frac{1}{2} \alpha_6\, \dot{q}_6^2 + \frac{1}{2} R_1\, i_1^2 + \frac{1}{2} R_2\, i_2^2$$

α et R désignant les coefficients de dissipation mécanique et les résistances électriques.

Les équations électriques du système peuvent être obtenues par application de (86). On aura:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{25}} \dot{q}_{25} + i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{26}} \dot{q}_{26} + i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{14}} \dot{q}_{14} + R_1\, i_1 = v_1$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{25}} \dot{q}_{25} + i_1 \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{26}} \dot{q}_{26} +$$

$$+ i_1 \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{14}} \dot{q}_{14} + i_2 \frac{\partial L_2}{\partial q_{25}} \dot{q}_{25} + i_2\, \dot{q}_{26} \frac{\partial L_2}{\partial q_{26}} + R_2\, i_2 = v_2 - (\dot{q}_5 - \dot{q}_{25}) \left(\frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial q_{25}} i_2 + \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{25}} i_1 \right)$$

Les équations mécaniques sont obtenues par application de (87) :

$$\frac{1}{2} J_4 \ddot{q}_4 + \alpha_4 \dot{q}_4 = \Gamma_4 + \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{14}} i_1 i_2$$

$$\frac{1}{2} J_5 \ddot{q}_5 + \alpha_5 \dot{q}_5 = \Gamma_5 + \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial q_{25}} i_2^2 + \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{25}} i_1 i_2$$

$$\frac{1}{2} J_6 \ddot{q}_6 + \alpha \dot{q}_6 = \Gamma_6 + \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial q_{26}} i_2^2 + \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{26}} i_1 i_2$$

Aux équations précédentes il faut ajouter encore les relations

$$q_{14} = q_4 ; \; q_{26} = q_6 ; \; q_{25} = - q_6 + C_t$$

qui définissent les q_{au} en fonction de q_u.

Considérons d'abord le cas où tous les q_u sont nuls :

$$\dot{q}_4 = 0 \qquad \dot{q}_5 = 0 \qquad \dot{q}_6 = 0$$

alors les $\dot{q}_{au}$ seront aussi nuls.

Les équations électriques deviennent simplement :

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1 = v_1$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 = v_2$$

Ce sont les équations d'un transformateur à deux enroulements.

Les premiers membres des équations mécaniques sont nuls ; ces équations traduiront alors, seulement, l'équilibre entre forces appliquées et forces électrodynamiques.

Il est intéressant de remarquer que la réaction au couple $\frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial q_{25}} i_2^2$ se trouve sur les conducteurs extérieurs de l'induit avec la valeur $- \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial q_{26}} i_2^2$. En fait, parce que les sens positifs à adopter pour q_{25} et q_{26} sont opposés (d'après la convention qu'à un travail positif des couples appliqués Γ_5 et Γ_6 correspond une énergie absorbée par le système) on a

$$\frac{\partial L_2}{\partial q_{25}} = \frac{\partial L_2}{\partial q_{26}}$$

On trouve ici une différence importante par rapport à la machine à commutation, où les conducteurs extérieurs ne participent pas à la conversion d'énergie ; le couple de self-induction de l'induit est associé à la saillance du stator et c'est sur celui-ci qu'on trouve sa réaction.

En ce qui concerne les couples associés à l'induction mutuelle, il est intéressant de remarquer que dans le cas où le champ magnétique peut être considéré comme pratiquement uniforme, il sera

$$\frac{\partial M_{12}}{\partial q_{14}} \simeq 0$$

$$\frac{\partial M_{12}}{\partial q_{25}} \simeq \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{26}}$$

Alors la réaction du couple sur la roue se trouve, aussi, sur les conducteurs extérieurs.

Le fonctionnement normal comme roue de Barlow du système de la fig. 5 correspond à faire

$$\dot{q}_4 = \dot{q}_{14} = 0$$

$$\dot{q}_6 = \dot{q}_{26} = 0 \qquad \dot{q}_{25} = 0$$

Dans ce cas les équations de mouvement deviendront :

$$L_1 \frac{d\,i_1}{d\,t} + M_{12} \frac{d\,i_2}{d\,t} + R_1\, i_1 = v_1$$

$$L_2 \frac{d\,i_2}{d\,t} + M_{12} \frac{d\,i_1}{d\,t} + R_2\, i_2 = v_2 - \dot{q}_5 \left(\frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial q_{25}}\, i_2 + \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{25}}\, i_1 \right)$$

$$\frac{1}{2} J_5\, \ddot{q}_5 + \alpha_5\, \dot{q}_5 = \Gamma_5 + \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{\partial q_{25}}\, i_2^2 + \frac{\partial M_{12}}{\partial q_{25}}\, i_1\, i_2$$

On pourrait de la même façon, obtenir les équations de fonctionnement en «alternateur» du système de la fig. 4, si on imagine les balais liés à la roue.

Les conditions à introduire seraient alors :

$$\dot{q}_4 = \dot{q}_{14} = 0$$

$$\dot{q}_5 = \dot{q}_{25} = \quad \dot{q}_6 = -\,\dot{q}_{26}$$

Ou obtiendrait ainsi les équation de deux spires tournant l'une par rapport à l'autre.

E — CONCLUSION

La méthode présentée permet d'obtenir les équations dynamiques des machines électriques tout à fait générales, que la machine soit saturée ou non et que la distribution de f. m. m. soit sinusoidale ou non.

Notre objectif a été, seulement, d'étudier la conversion électromécanique de l'énergie et dans ce but on a dégagé les circuits de toute liaison extérieure. Pourtant, la méthode utilisée est généralisable à des systèmes complexes de machines.

Une application immédiate des résultats obtenus est l'analyse matricielle des machines électriques. En fait, la matrice $\mathcal{G}$ peut maintenant être définie dans toute sa généralité, que la distribution du champ magnétique soit sinusoidale ou non. Ce résultat nous permettra d'établir une équation matricielle applicable à toutes les machines linéaires, ce qui sera l'objet d'une prochaine publication.

Je veux remercier mes collègues S. K. Tso, de l'Université de Birmingham et Jervis Pereira, de l'Université de Lisbonne, d'avoir accepté de critiquer mes premières études sur cette question.

Le travail s'est poursuivi à l'Université de Nancy, où le Professeur E. Gudefin, a mis à ma disposition toute son expérience sur les machines électriques. Je tiens à l'en remercier très vivement.

Enfin, je remercie mon collègue P. Graff de m'avoir aidé à rédiger cet article.

BIBLIOGRAPHIE

[1] C. Maxwell — «Traité d'électricité et de magnétisme» (Trad. française). Ed. Gauthier — Villars, 1885.

[2] E. Carvallo — «L'électricité déduite de l'expérience et ramenée au principe des Travaux Virtuels», Col. Scientia, Ed. C. Naud, 1902.

[3] Lienard — C. R. Academie Sciences Paris, T. 134, p. 163, 1902.

[4] P. Appell — C. R. Academie Sciences Paris, T. 154, p. 1037, 1912.
— «Sur une forme générale des équations de la dynamique», Memorial des Sciences Math ématiques Ed. Gauthier-Vilars, 1925.
[5] C. V. Jones — «An analysis of commutation for the unified machine theory», Proc. IEE, 1958, 105, Part C.
[6] L. V. Bewbley — «Flux linkages and electromagnetic induction», Dover Publications Inc., 1964.
[7] G. Kron — «Tensor for circuits», Dover Publications Inc., 1959 (Ce livre contient une liste complète des publications de Kron).
[8] K. Kondo and Y. Ishizuka — «Geometrical aspects of Kron's non-Riemannian electrodynamic», Memoirs of the unifying study of the basic problems in engineering sciences by means of geometry, Ed Gakujutsu Bunken Fukyu-Kai, Tokio, 1955.
[9] D. C. White and H H. Woodson «Electromechanical energy conversion», Ed John Wiley & Sons, 1959.
[10] H. Goldstein — «Mecanica Clasica», (Trad. espagnole), Ed. Aguilar, 1963.
[11] N. Rouche — «Les équations de Lagrange des systèmes électromécaniques», Revue Générale de l'Électricité, Tome 75, n° 7-8, 1966.
[12] J. Jeans — «The mathematical theory of electricity and magnetism», Cambridge University Press, 1951.
[13] E. T. Whittaker — «Analytical Dynamics of particles and rigid bodies», Cambridge University Press, 1965.
[14] L. Brillouin — «Les tenseurs en mécanique et en elasticité», Ed. Masson et Cie, 1949.
[15] E. Dubois — «Electromagnetisme», 3 tomes, Ed. Delagrave, 1953.
[16] W. Panofsky and M Phillips — «Classical electricity and magnetisme», Ed. Addison-Wesley, 1962.
[17] J. Peres — «Mécanique Générale», Ed. Masson et Cie, 1953.
[18] Beghin — «Étude théorique des compas gyrostatiques Anschutz et Sperry», thèse 1727, Paris, 1922.
[19] J. A. Shouten — «Tensor Analysis for Physicists», Oxford University Press, 1951.
[20] L. V Bewley — «Tensor analysis of electric circuits and machines», Ronald Press Company, 1961.

A "anatomia" dos semicondutores, em 230 páginas...
...nos dois dos novos catálogos de semicondutores da AEG.

Neles encontrará, os dados técnicos, as tabelas e os circuitos de que necessita para o seu caso ou outras aplicações.
Quer se trate de unidades simples ou de jogos comandáveis por tiristores: fornecemos sempre o mais indicado para o seu problema.
Se tiver um caso de solução particularmente difícil, por exemplo que requeira alta velocidade de ignição: a AEG, com o seu princípio do "emissor de campo transversal" está à testa da evolução de semicondutores. As mais recentes técnicas de produção garantem a alta qualidade, proverbial dos nossos produtos.
Os diodos de silício da AEG cumprem tudo o que se pode pedir destes elementos: Possibilidade em c. c., de 200 a 800 V (tensão de bloqueio), com 4 a 220 A (intensidade) por célula rectificadora.

Para mais pormenores poderá V. Exa. consultar os nossos catálogos, que lhe enviaremos com o máximo prazer.
Se preferir, no entanto, aconselhar-se pessoalmente, visite-nos na

dist. Belarte

AEG

LUSITANA DE ELECTRICIDADE, SARL
LISBOA **PORTO**

HIDREL

Técnica de Hidráulica e de Electricidade, Limitada

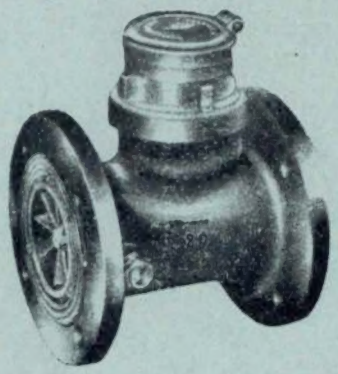
OFICINAS METALÚRGICAS, HIDRÁULICA, ELECTRICIDADE E MECÂNICA

ASSISTÊNCIA TÉCNICA

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS DE:

CONTADORES PARA LÍQUIDOS

Sistema «Woltman»



LG

LANGE

De:

50 m/m

a

300 m/m

Escritório e Stand de Vendas
47-A, Rua do Alecrim, 47-B — LISBOA
Telef. 32 57 00 - 3 59 66

Companhia Portuguesa de Trefilaria

S. A. R. L.

ARMADURAS PRÉ-FABRICADAS **MALHASOL**

Tensão de segurança 3.000 Kgf/cm²

AÇO BI

Tensão de segurança 4.000 Kgf/cm²

AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO

que pela eficiência técnica e económica a que conduzem, são um indispensável elemento na moderna construção civil

Para qualquer obra em betão armado consulte:

DIAL — GABINETE TÉCNICO

R. DO INSTITUTO INDUSTRIAL, 18-1.º Dt.º
TELEFONES 67 12 24/5 e 67 37 85 - LISBOA

CONSTRUÇÕES PRÉ-FABRICADAS 100% RECUPERÁVEIS

CASAS DE HABITAÇÃO
POUSADAS • MOTÉIS • ESCOLAS
ENFERMARIAS • IGREJAS • CASERNAS
HOSPITAIS • ARMAZÉNS

ESTRUTURAS METÁLICAS
DE GRANDES DIMENSÕES

ANDAIMES • PAVILHÕES • COBERTURAS

ALUGUER E VENDA

ESCODEL

UMA CERTEZA DO PRESENTE, COM A TÉCNICA DO PASSADO

SEDE: R. FERREIRA LAPA, 42, 1.º D.

TELEF. 55 31 23 — LISBOA

FÁBRICA — QUEIJAS